L. MENDEL

MANUEL PRATIQUE DE SOUDAGE A L'ARC

MANUELS PRATIQUES DUNOD

MANUEL PRATIQUE
DE SOUDAGE A L'ARC

PAR

L. MENDEL

Ingénieur technicien A. I. T. C.

Ancien Chargé de Cours professionnels de Soudure autogène.

Ex-Ingénieur chargé des questions de Soudure
aux Etablissements Fouga et Cie à Béziers.

Ancien Directeur général
de la S. A. Johnson, Matthey et Pauwels à Bruxelles.

SEPTIÈME ÉDITION
NOUVEAU TIRAGE

Établissements d'enseignement technique
Cours Professionnels
Formation Permanente

dunod

© BORDAS, Paris, 1976 – 098 879 0311
ISBN 2-04-003397 1

" Toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants-droit, ou ayants-cause, est illicite (loi du 11 mars 1957, alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal. La loi du 11 mars 1957 n'autorise, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, que les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective d'une part, et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration "

AVERTISSEMENT

Le désir de présenter cet ouvrage sous une forme simple et condensée, qui le rende accessible à tous, nous a conduit à développer principalement le soudage à l'électrode métallique des aciers courants de construction, de nuance douce et extra-douce qui représentent à l'heure actuelle la majeure partie du tonnage d'acier utilisé dans l'industrie. Toutefois, nous avons également donné des indications détaillées sur le soudage des autres aciers non alliés et alliés tels que les inoxydables, ainsi que des fontes et des métaux non-ferreux.

D'autre part,pour tenir compte de l'énorme développement survenu au cours des dernières années dans les applications des procédés de soudage semi-automatiques et automatiques (notamment sous protection gazeuse), nous avons développé de façon importante les chapitres traitant de ces techniques.

Les chapitres consacrés au soudage manuel à l'électrode individuelle, bien que sensiblement remaniés, n'ont été que faiblement réduits, et cela pour deux raisons. D'une part, la plupart des principes et des connaissances de base indispensables en soudage manuel se retrouvent appliqués en soudage à la machine. D'autre part, la nécessité de *former* des soudeurs a conservé toute son importance, et nous en voulons pour preuve l'étude récente d'une Norme Internationale ISO relative à la *qualification* des soudeurs. On ne peut en effet, former un ouvrier de cette catégorie en le faisant directement travailler sur des machines relativement complexes : il faut qu'il ait d'abord "fait ses classes" en manipulant des électrodes de différentes catégories afin de "sentir" le métier, et qu'il ait acquis, même dans le domaine manuel, la notion des *paramètres* * qui est essentielle pour comprendre le réglage des machines de soudage (1).

---

(1) Afin de ne pas alourdir le texte, nous avons dressé à la fin de l'ouvrage un lexique rappelant la définition de certains termes utilisés et susceptibles de ne pas être parfaitement compris par le lecteur. Les termes qui, dans le texte, sont suivis d'un astérisque (*) renvoient donc à ce lexique.

Les chapitres de ce manuel déjà consacrés, dans les éditions précédentes, aux rechargements anti-usure, au soudage à l'arc submergé sous flux solide, bien entendu aux soudages TIG et surtout MIG, au soudage par bombardement électronique, au soudage au plasma, ont été développés et mis à jour.

A l'inverse de ces développements, les chapitres traitant du soudage à l'hydrogène atomique et du soudage à l'électrode en charbon, - tous deux tombés en désuétude, - ont été considérablement réduits, bien qu'un nouvel exposé ait été introduit au sujet du gougeage à l'arc au charbon et à l'air comprimé, procédé dérivé du soudage à l'électrode au charbon et d'ailleurs utilisé dans la préparation ou la correction de certaines soudures à l'arc.

Dans la description de la technique du soudage, nous nous sommes efforcé d'expliquer le plus souvent les notions exposées par des exemples vécus, tirés de la pratique, car, - nous l'avons constaté plus d'une fois, - il peut exister une différence sensible entre les données tirées des essais d'un "laboratoire de soudage" et les enseignements des opérations effectuées "sur le tas".

Nous n'avons pas eu d'autre but que d'aider les ouvriers, élèves et apprentis soudeurs à l'arc à mieux comprendre et par suite à mieux appliquer la technologie du métier. Toutefois, nous espérons que notre ouvrage sera lu avec intérêt par le personnel de maîtrise, qui y trouvera, sous une forme condensée, des précisions de nature à l'aider dans sa tâche d'éducation et de contrôle des soudeurs à l'arc, que ceux-ci soient amenés à travailler à l'électrode manuelle ou à utiliser des appareils plus ou moins automatiques.

Rappelons cependant, afin de prévenir certaines objections, que notre manuel se limite à l'exposé des procédés de soudage basés sur l'emploi d'un arc électrique. On n'y trouvera donc aucune indication sur des procédés dont certains mettent aussi à profit l'énergie électrique mais sans qu'il se produise, sauf exception, un arc proprement dit : le soudage par résistance (dont l'importance est considérable),les soudages par friction, par ultrasons, par explosion, par laser, etc...

Pour terminer, nous désirons exprimer nos sincères remerciements à M. Alain MOULART, Ingénieur technicien au Service Exportation de la société SOUDOMETAL à Bruxelles, qui a bien voulu relire le manuscrit de l'édition précédente et nous suggérer un certain nombre de mises à jour.

L.M.

Les sociétés suivantes ont bien voulu mettre à notre disposition les documents qui nous ont permis de compléter l'illustration de notre manuel : l'Air Liquide, Arcos, l'Oxhydrique Internationale, Soudométal, la Soudure Autogène Française. Nous tenons à les en remercier bien sincèrement.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION : SITUATION DE L'ASSEMBLAGE SOUDÉ DANS LES FABRICATIONS MÉTALLIQUES D'AUJOURD'HUI

PREMIÈRE PARTIE : PRINCIPES ET MATERIEL DU SOUDAGE A L'ARC

CHAPITRE 1 : PRINCIPES

1.1. Soudage autogène par fusion 7
1.2. Principaux procédés de soudage autogène par fusion 7
1.3. Caractères généraux du soudage à l'électrode métallique .. 8
1.4. Principe du soudage à l'arc à l'électrode métallique 9
1.5. Intensité du courant de soudate et vitesse d'avancement . 11
1.6. Tension d'amorçage et tension d'arc 12
1.7. Puissance de l'arc 12

CHAPITRE 2 : LES POSTES DE SOUDAGE

2.1. Rôle des appareils ou "postes" de soudage 14
2.2. Caractéristique plongeante de l'appareil de soudage 14
2.3. Constitution schématique générale d'une installation de soudage 15
2.4. Courant continu et courant alternatif 16
2.5. Haute fréquence 17
2.6. Déphasage du courant alternatif. Facteur de puissance (cosinus phi) 18
2.7. Courants triphasés. Equilibrage des phases 19
2.8. Choix du poste de soudage 21
a. La puissance électrique nécessaire 21
b. La nature de la force motrice dont on dispose 22
c. Les conditions d'utilisation 27
d. Les exigences de la compagnie distributrice 28
e. Le mode de réglage du courant de soudage 29

CHAPITRE 3 : LES ÉLECTRODES ET LE MATÉRIEL ACCESSOIRE

3.1. Electrodes nues 31
3.2. Electrodes enrobées 31

3.3. Dimensions des électrodes 32
3.4. Epaisseur de l'enrobage 32
3.5. Choix de l'électrode 33
a. Les propriétés mécaniques du métal déposé 34
b. Les caractéristiques d'utilisation 35
c. Les caractéristiques économiques 36
d. Les différentes propriétés des enrobages 37
e. Classification des enrobages et propriétés caractéristiques de chaque classe 39
3.6. Outillage accessoire du soudeur à l'arc 50
3.7. Matériel de protection du soudeur 52
3.8. Matériel de contrôle 53

CHAPITRE 4 : MESURES DE SÉCURITÉ ET D'HYGIÈNE

4.1. Dangers électriques 55
4.2. Dangers d'incendie ou d'explosion 55
4.3. Protection du soudeur 55
4.4. Emploi de divers gaz 56

DEUXIÈME PARTIE : TECHNIQUE DU SOUDAGE À L'ÉLECTRODE MÉTALLIQUE DES ACIERS ORDINAIRES

CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET PRÉPARATION DES JOINTS

5.1. Forme du joint soudé 59
5.2. Positions de la soudure 60
5.3. Préparation des joints à souder 61

CHAPITRE 6 : EXÉCUTION DU SOUDAGE

6.1. Fixation des bords. Pointage 67
6.2. Modes d'exécution des cordons de soudure 68
6.3. Intensité du courant de soudage en fonction du diamètre de l'électrode 70
6.4. Choix du diamètre de l'électrode en fonction de l'épaisseur de la pièce 71
6.5. Choix du diamètre de l'électrode, du mode d'exécution et de l'intensité du courant de soudage en fonction de la forme et de la position du dépôt 73
6.6. Position du soudeur 75
6.7. Amorçage de l'arc 76
6.8. Longueur de l'arc 76
6.9. Inclinaison de l'électrode 77
6.10. Piquage du laitier 78
6.11. Exécution des soudures bout à bout, à plat 79
6.12. Exécution des soudures en angle extérieur 84
6.13. Exécution des soudures par recouvrement 85

6.14. Exécution des soudures en angle intérieur 86
6.15. Exécution des soudures sur tranches 88
6.16. Exécution des soudures en bouchon 88
6.17. Exécution des soudures verticales (montantes et descendantes) 89
6.18. Exécution des soudures horizontales sur plan vertical .. 90
6.19. Exécution des soudures au plafond ou surélevées 91
6.20. Soudage de pièces d'épaisseur différente 91
6.21. Longueur minimale des cordons de soudure 92
6.22. Rechargements ordinaires (acier doux) 92

CHAPITRE 7 : REPRÉSENTATION SYMBOLIQUE DES SOUDURES SUR LES DESSINS

7.1. Normalisation 94
7.2. Symboles élémentaires 94
7.3. Symboles supplémentaires 95
7.4. Ligne de référence 95
7.5. Exemple d'application de symboles élémentaires et supplémentaires 95
7.6. Cotation 96
7.7. Indication éventuelle du procédé de soudage 96

CHAPITRE 8 : DILATATION ET RETRAIT

8.1. Dilatation et retrait en soudage à l'arc. Principes 97
8.2. Réduction et correction des effets de la dilatation et du retrait 99

CHAPITRE 9 : CONTRÔLE DE LA QUALITÉ

9.1. Principes du contrôle de la qualité d'exécution des soudures 104
9.2. Défauts d'exécution décelés par l'examen visuel des soudures 104
9.3. Défauts d'exécution internes 107
9.4. Défauts d'exécution décelés par l'examen de la cassure . 107
9.5. Remarque importante sur les défauts d'exécution 109
9.6. Macrographie 110
9.7. Essais non destructifs. Radiographie. Gammagraphie. Ultrasons 111
9.8. Essais d'étanchéité 113
9.9. Essais à la pression hydraulique 114

CHAPITRE 10 : PRIX DE REVIENT DU SOUDAGE

10.1. Facteurs du prix de revient 115
10.2. Consommation d'électrodes 116
10.3. Main-d'oeuvre de pointage 120
10.4. Main-d'oeuvre de soudage 120
10.5. Energie électrique 123

TROISIÈME PARTIE : TECHNIQUE DU SOUDAGE À L'ÉLECTRODE MÉTALLIQUE DES MÉTAUX AUTRES QUE LES ACIERS ORDINAIRES

CHAPITRE 11 : AUTRES ACIERS

11.1. Les différentes catégories d'aciers 129
11.2. Aciers au carbone 130
11.3. Aciers semi-inoxydables 131
11.4. Aciers inoxydables au chrome 131
11.5. Aciers inoxydables au chrome-nickel (austénitiques) 132
11.6. Aciers austénitiques au manganèse 135

CHAPITRE 12 : RECHARGEMENTS ANTI-USURE

12.1. Particularités des rechargements anti-usure à l'arc 136
12.2. Electrodes pour le rechargement anti-usure de l'acier .. 137
12.3. Parachèvement des surfaces rechargées 141

CHAPITRE 13 : SOUDAGE DES FONTES ET DES MÉTAUX NON-FERREUX

13.1. Fontes 142
13.2. Cuivre et alliages 147
13.3. Nickel et alliages 148
13.4. Aluminium et alliages légers 149

QUATRIÈME PARTIE : PROCÉDÉS SPÉCIAUX

CHAPITRE 14 : SOUDAGE SOUS FLUX SOLIDE ÉLECTROCONDUCTEUR

14.1. Principe et caractéristiques du procédé 153
14.2. Le procédé "Electroslag" 155

CHAPITRE 15 : SOUDAGE À L'ÉLECTRODE EN CHARBON

15.1. Principe et caractéristiques du procédé 157
15.2. Gougeage ou rainurage à l'électrode de graphite 158

CHAPITRE 16 : SOUDAGE À L'HYDROGÈNE ATOMIQUE

16.1. Principe et caractéristiques du procédé 159

CHAPITRE 17 : LES PROCÉDÉS DE SOUDAGE À L'ARC SOUS PROTECTION GAZEUSE

17.1. Principe des procédés 161
17.2. Classification des divers procédés 161

17.3. Avantages globaux des procédés de soudage sous protection gazeuse 162
17.4. Le procédé TIG 162
17.5. L'appareillage du procédé TIG 163
17.6. Technique du soudage TIG de l'aluminium et des alliages légers 169
17.7. Technique du soudage TIG des aciers inoxydables 175
17.8. Technique du soudage TIG du cuivre 177
17.9. Technique du soudage TIG du nickel et de ses alliages ... 177
17.10. Technique du soudage TIG du titane 179
17.11. Technique des rechargements anti-usure par le procédé TIG 180
17.12. Soudage TIG par points 180
17.13. Le procédé MIG 181
17.14. L'appareillage du procédé MIG 184
17.15. Technique du soudage MIG de l'aluminium et des alliages légers 186
17.16. Technique du soudage MIG des aciers non alliés ou faiblement alliés 190
17.17. Technique du soudage MIG des aciers inoxydables 194
17.18. Technique du soudage MIG du cuivre 195
17.19. Technique du soudage MIG du nickel et de ses alliages .. 196

CHAPITRE 18 : SOUDAGE AU PLASMA

18.1. Principe du procédé 197
18.2. Soudage automatique au plasma 198
18.3. Soudage manuel ou microplasma 199
18.4. Rechargement et projection au plasma 200

CHAPITRE 19 : SOUDAGE PAR BOMBARDEMENT ÉLECTRONIQUE

19.1. Principe du procédé 204
19.2. Applications 205

APPENDICE : RAPPEL DE QUELQUES DÉFINITIONS 207

SYMBOLES CHIMIQUES D'ÉLÉMENTS CITÉS DANS CE MANUEL 211

INTRODUCTION

SITUATION DE L'ASSEMBLAGE SOUDÉ DANS LES FABRICATIONS MÉTALLIQUES D'AUJOURD'HUI

Le développement et l'essor de la construction par soudage n'ont commencé qu'après la première guerre mondiale, vers 1920. Auparavant, la seule technique permettant l'assemblage permanent des éléments métalliques autres que les feuilles minces était le *rivetage à chaud*. Le caractère essentiel de ce procédé est cependant sa limitation à l'assemblage *par recouvrement*, que les pièces à réunir soient simplement superposées (*fig.01* et *02*) ou bien qu'elles soient ajustées bord à bord et rivées grâce à l'adjonction de couvre-joints simples (*fig.03*) ou le plus souvent doubles (*fig.04*) . Le rivetage nécessite donc un supplément appréciable de matière : recouvrements, couvre-joints, rivets.

Fig.0.1.

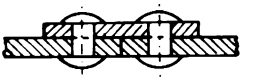


Fig.0.3.

Fig.0.2.

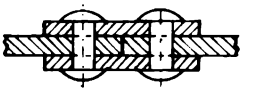


Fig.0.4.

Fig.0.5

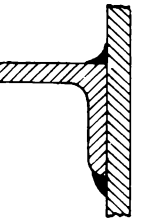


Fig.0.6

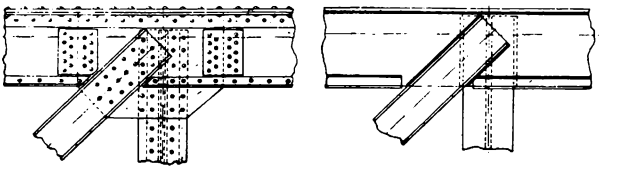


Fig.0.7

D'autre part, ces quelques croquis élémentaires, représentant les cas les plus simples, montrent déjà la complication d'une rivure par comparaison avec une soudure bout à bout (*fig.05*), disposition le plus fréquemment appliquée notamment dans l'assemblage des corps creux (tuyauteries, réservoirs) et par comparaison avec une soudure par recouvrement ou une soudure d'angle (*fig.06*) , modes d'assemblage beaucoup plus répandus en construction de charpentes.

La *figure 07* constitue un exemple plus complet de construction par rivetage et de construction par soudage, qui fait encore mieux ressortir la simplicité de la charpente soudée.

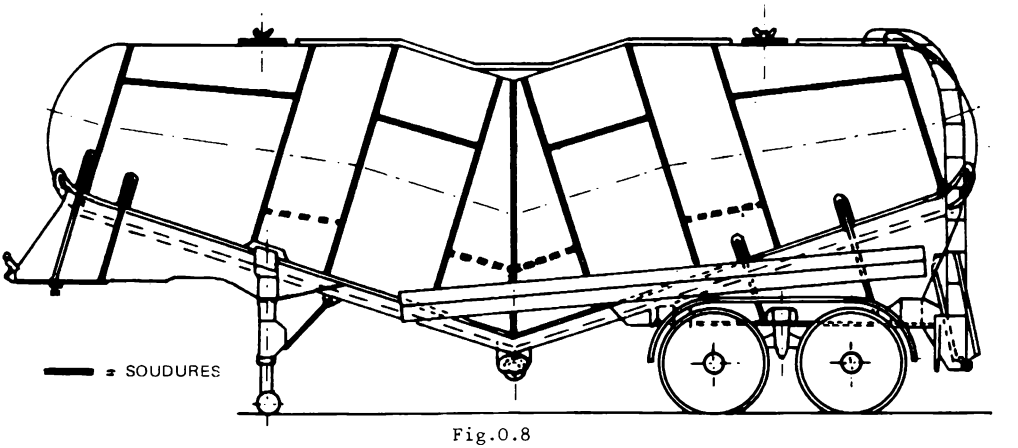


Fig.0.8

Quant à la *figure 08*, elle représente une remarquable réalisation de citerne soudée d'une forme très originale, dite "en V" , destinée au transport de produits pulvérulents (1). Cette citerne, d'une capacité de 34 m^3 , est en alliage d'aluminium AZ 5G ; elle est soudée pour sa plus grande part par le procédé MIG de soudage sous argon. Son exécution par rivetage eût été impensable.

Il faut encore noter qu'en construction rivée, la section des tôles et des barres considérée dans les calculs de résistance est leur section totale *diminuée* de celle des trous de rivets. En construction soudée, c'est leur section *pleine*. Aussi peut-on souvent utiliser des éléments de section moindre, d'où une économie supplémentaire de matière et de poids.

Cette économie, qui atteint couramment 15%, n'est pas le seul facteur qui ait favorisé l'extension extraordinaire de ce mode d'assemblage. Il faut encore citer l'économie de main-d'oeuvre et la plus grande rapidité d'exécution. Les frais de traçage et de perçage des trous de rivets, de chauffage et de pose des rivets eux-mêmes, de matage éventuel (étanchéité!), de préparation et d'ajustage des recouvrements et des couvre-joints, dépassent largement, dans la quasi-totalité des cas, l'ensemble des frais de préparation et d'assemblage de la construction soudée correspondante.

D'autres considérations ont plus ou moins puissamment aidé au développement des procédés de soudage :

(1) Constructeur : Etablissements F. FILLIAT à Vénissieux (Rhône).

a) du point de vue de la durée, la meilleure tenue des soudures bout à bout vis-à-vis de la corrosion et de la fatigue * , parce que ces soudures constituent un ensemble monolithique, c'est-à-dire sans solution de continuité, et qu'elles travaillent généralement à la traction et non au cisaillement comme les rivures ;
b) du point de vue du personnel d'exécution et de l'atmosphère de travail, l'élimination de tout ce que l'opération de rivetage à chaud a de pénible : bruit assourdissant et trépidations ;
c) enfin, du point de vue esthétique, l'aspect plus net et moins chargé des assemblages, comme l'ont déjà montré les *figures 07* et *08*.

Il a fallu, il est vrai, plusieurs dizaines d'années de perfectionnements incessants pour que l'assemblage soudé, encore considéré en 1920 dans certains pays comme un "vice de construction", devienne admis, codifié et généralisé dans tous les domaines. Ces perfectionnements sont le résultat de patientes et multiples expériences effectuées dans toutes les industries pour lesquelles ce développement est vital : celles des électrodes, des gaz industriels, du carbure de calcium, de la construction du matériel de soudage, aiguillonnées par leur compétition.

Et c'est ainsi qu'à partir du petit nombre de procédés relativement simples encore appliqués avant la dernière guerre (1) s'est développée progressivement une gamme très étendue de techniques souvent complexes et visant à l'assemblage des pièces métalliques : pas seulement celles du soudage, du reste, mais aussi celles du brasage (2).

Le champ d'application des procédés de soudage s'étend aujourd'hui bien au-delà de celui de l'ancien rivetage à chaud. Les épaisseurs en jeu vont en effet de la feuille la plus mince aux énormes corps cylindriques fabriqués pour les centrales nucléaires et dont l'épaisseur peut atteindre 100 mm. Quant aux matériaux auxquels s'appliquent ces multiples techniques, ils vont de l'acier doux le plus courant aux alliages réfractaires les plus complexes, les plus coûteux, comme ceux actuellement employés en astronautique, et même jusqu'aux métaux précieux proprement dits.

On peut énumérer comme suit les principales branches industrielles dans lesquelles les divers procédés de soudage sont le plus largement utilisés :

fûts et emballages métalliques ;
bouteilles soudées pour gaz liquéfiés ;
chaudières ;
chaudronnerie tous métaux ;

---

(1) Le Manuel pratique de Soudure électrique à l'arc (1938) de R. GRANJON et SALLELES en cite 18. La nomenclature donnée dans la norme AFNOR E 04-021 de novembre 1972 en mentionne 65.
(2) Le soudage aux gaz ou au chalumeau ainsi que le brasage font l'objet d'un autre ouvrage, le "Manuel pratique de soudage aux gaz et de coupage thermique", du même auteur (Dunod édit.)

tuyauteries et pipelines ;
ponts ;
charpentes et ossatures métalliques ;
appareils de levage et de manutention ;
construction navale ;
matériel de chemin de fer et de tramway ;
construction automobile et cycles ;
construction de machines motrices ;
construction électrique ;
électronique ;
construction aéronautique et spatiale ;
armements ;
construction du matériel pour l'industrie nucléaire.

Ajoutons enfin que les services d'entretien de la plupart des entreprises de quelque importance, ainsi que les ateliers artisanaux font, eux aussi, fréquemment appel à l'un ou l'autre des procédés de soudage.

PREMIÈRE PARTIE

PRINCIPES ET MATÉRIEL DU SOUDAGE A L'ARC

CHAPITRE 1

PRINCIPES

1.1. SOUDAGE AUTOGÈNE PAR FUSION

Le *soudage* autogène par fusion est un procédé qui consiste à *assembler* deux pièces de métal de *même* nature en provoquant en même temps la fusion * de leurs bords et (en général) celle d'une baguette de métal de *même nature* également, de façon à obtenir, après solidification *, un joint aussi *homogène* * que possible. Ce joint est appelé une *soudure autogène*.

Mieux cette homogénéité sera assurée, moins la liaison présentera de défauts de continuité, plus les propriétés de la pièce soudée se rapprocheront de celles d'une pièce *pleine*, c'est-à-dire sans joint, de même nature.

On appelle *métal de base* celui qui constitue les pièces à assembler, *métal d'apport* celui fourni par la baguette.

Le même procédé peut être utilisé pour *recharger* une pièce métallique (métal de base) en provoquant sa fusion sur une certaine profondeur en même temps que celle d'une baguette de métal d'apport. Ce dernier peut être de même nature que le métal de base, par exemple, s'il s'agit simplement de remettre en état une pièce usée. Il peut être intentionnellement différent, par exemple plus dur, si l'on désire augmenter la résistance de la pièce à l'usure.

1.2. PRINCIPAUX PROCÉDÉS DE SOUDAGE AUTOGÈNE PAR FUSION

a) Soudage aux gaz ou au chalumeau.

Dans ce procédé, la chaleur nécessaire est fournie par la combustion d'un gaz à pouvoir calorifique très élevé, généralement l'acétylène, activée par le mélange préalable de ce gaz, dans un appareil appelé chalumeau, avec un gaz comburant : l'oxygène. Température de la flamme : 3 000° C environ.

La source de *chaleur* (flamme) est, dans ce procédé, *indépendante de l'apport de métal :* on peut donc chauffer, et fondre, en apportant plus ou moins de métal ou même sans en apporter.

L'échauffement et la fusion ne sont pas instantanés et les pièces sont chauffées sur une zone assez large de part et d'autre du joint. Il peut en résulter des déformations relativement importantes. Par contre, en raison même de cet échauffement assez étendu, le refroidissement est relativement lent, ce qui permet souvent de corriger les déformations par martelage pendant que les parties déformées se trouvent encore au rouge ; beaucoup de corrections de déformations peuvent d'ailleurs se faire pendant le soudage, par chauffage localisé au chalumeau.

b) Soudage à l'arc électrique

Sous cette dénomination, on comprend à l'heure actuelle plusieurs procédés nettement différents, suivant que :

- l'arc s'établit *entre une électrode fusible* , fournissant le métal d'apport d'une part, *et les pièces à souder*, d'autre part :
  .à travers l'air : soudage *à l'électrode métallique* (Ière, IIè et IIIè parties) ;
  .à travers un gaz : soudage à l'arc *sous protection gazeuse, à l'électrode consommable* (chapitre 17.13 à 17.19) ;
  .au sein d'un mélange de matières solides recouvrant les pièces à souder : soudage à l'arc *sous flux électroconducteur* (chapitre 14) ;
- l'arc s'établit *entre une électrode non fusible* ne fournissant donc pas le métal d'apport, d'une part, *et les pièces à souder*, d'autre part :
  .l'électrode étant en carbone : soudage *à l'électrode en carbone* (chapitre 15.1) ;
  .l'électrode étant en tungstène et l'arc étant protégé par un courant de gaz : *soudage sous protection gazeuse à l'électrode réfractaire* (chapitre 17.4 à 17.12) ;
- l'arc s'établit *entre deux électrodes non fusibles*, les pièces à souder n'étant pas dans le circuit électrique et l'appareil portant les électrodes débitant un courant de gaz hydrogène : *soudage à l'hydrogène atomique* (chapitre 16).

Certains procédés relativement récents constituent des combinaisons des procédés définis ci-dessus (voir chapitres 18 et 19).

Dans les trois premières parties de ce manuel, nous étudierons exclusivement le soudage à l'électrode métallique qui constitue le procédé actuellement le plus répandu, tout au moins pour les métaux ferreux, et qui s'applique manuellement dans la grande majorité des cas.

1.3. Caractères généraux du soudage à l'électrode métallique

Dans ce procédé, la chaleur nécessaire est produite par le passage du courant électrique, sous forme d'arc lumineux, entre la pièce

ou les pièces de métal de base et la baguette, alors appelée *électrode*. Température de l'arc : 4 000 à 4 500°C.

L'arc provoque la fusion progressive du métal de l'électrode et celui du métal de base au point où l'arc l'atteint (point "d'impact" de l'arc) ainsi que le passage du métal de l'électrode sur le métal de base.

Par conséquent, dans ce procédé, la source de chaleur (énergie électrique) et l'apport du métal sont *dépendants l'un de l'autre* : si l'on veut chauffer davantage, on apporte davantage de métal (1) et l'on ne peut chauffer sans en apporter.

La fusion du métal sous l'arc est pratiquement instantanée, de sorte que l'échauffement est beaucoup plus étroitement *localisé* qu'en soudage au chalumeau. Les déformations sont donc en général moindres, mais le refroidissement très rapide ne permet pas de les corriger par martelage au rouge à moins de disposer d'un mode de chauffage auxiliaire (chalumeau) ce qui nécessite alors l'intervention de deux installations, une de soudage à l'arc et une de soudage aux gaz. En outre, ce brusque refroidissement, en empêchant les tensions de dilatation ou de retrait de se libérer par des déformations (voir § 8.1) peut laisser subsister des *tensions résiduelles* * plus ou moins importantes. Enfin, le refroidissement rapide est susceptible de provoquer certains effets de *trempe* * (§ 11.2), dont doivent souvent tenir compte ceux qui conçoivent, calculent et dirigent les travaux de construction soudée. Nous verrons par la suite comment les effets du refroidissement rapide peuvent être combattus.

1.4. Principe du soudage à l'arc à l'électrode métallique

Si les deux bornes *a* et *b* d'une source de courant électrique *G* (appropriée au soudage) sont reliées par des conducteurs, d'une part à une pièce *P*, d'autre part à une baguette métallique ou électrode *E*:

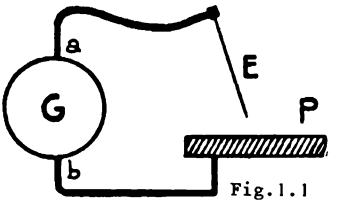


Fig.1.1

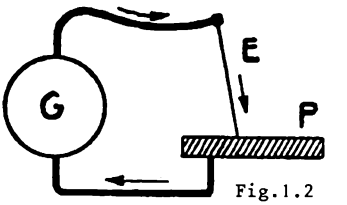


Fig.1.2

Figure 1.1 : Tant qu'il n'y a pas eu contact entre l'électrode et la pièce, aucun courant ne passe, la résistance de l'air sec au passage du courant étant beaucoup trop élevée. Le circuit est dit "ouvert" .

(1) Nous verrons § 6.8 qu'on peut cependant, en maintenant un arc long, augmenter quelque peu la quantité de chaleur fournie par rapport à la quantité de métal déposé.

Figure 1.2 : Si l'on touche la pièce avec l'électrode, ce contact "ferme le circuit" et provoque le passage d'un courant intense dit courant de *court-circuit*. Ce courant produit un échauffement du circuit entier mais cet échauffement se localise surtout à l'endroit où la résistance au passage du courant est la plus grande, c'est-à-dire à l'extrémité de l'électrode, où le contact est imparfait. Cette extrémité rougit. Il se produit à cet endroit un effet électrochimique appelé "ionisation" * , ainsi que des vapeurs métalliques qui rendent l'air conducteur du courant au voisinage immédiat du point de contact.

Figure 1.3 : A ce moment, si l'on écarte de quelques millimètres l'électrode de la pièce, le courant passe de l'une à l'autre à travers l'air devenu conducteur, en produisant un "arc" lumineux. L'extrémité de l'électrode fond sous forme de gouttelettes qui, à une cadence très

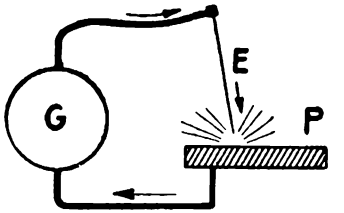


Fig.1.3

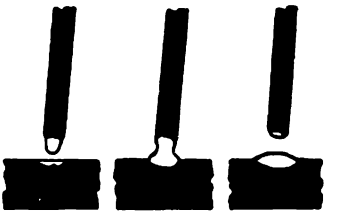


Fig.1.4

rapide, sont transportées dans l'arc lui-même de l'électrode à la pièce (*fig.1.4*). Au point d'impact de l'arc se forme, à partir de la surface de la pièce, un petit bain de métal en fusion plus ou moins profond : le métal déposé par l'électrode *se soude*, c'est-à-dire se lie d'une façon intime, au métal de base.

L'opération représentée *figure 1.2* constitue l'*amorçage* de l'arc.

Si, pendant que fond l'électrode, on la déplace progressivement le long de la surface du métal de base, le bain de fusion se déplace en même temps et le métal d'apport se dépose sous forme d'une *chenille* ou *cordon de soudure*.

Il faut toutefois, pendant que l'on soude, abaisser l'électrode à une vitesse correspondant à sa fusion. Si on l'abaisse trop lentement, l'extrémité de l'électrode s'écarte de façon excessive de la pièce, la résistance électrique devient trop grande et l'arc s'éteint (*désamorçage*). Si, au contraire, on l'abaisse trop vite, l'électrode vient se souder à la pièce, s'échauffe considérablement par suite du court-circuit ainsi produit et est rapidement mise hors d'usage (1).

Toute la technique opératoire du soudage manuel peut ainsi se résumer en deux mouvements, convenablement coordonnés :l'un, d'avancement dans un plan parallèle au cordon de soudure, l'autre d'abaisse-

(1) On peut cependant considérer que certaines électrodes peuvent être traînées sur le cordon sans que l'on ait à se préoccuper de maintenir un arc d'une longueur donnée (v. § 6.2).

ment de l'électrode vers ce cordon.

1.5. Intensité du courant de soudage et vitesse d'avancement

D'une façon simplifiée, l'intensité du courant électrique peut être considérée comme le *débit* de l'électricité, c'est-à-dire la *quantité* d'électricité qui passe *par seconde* dans un conducteur.

Elle se mesure en unités appelées *ampères* (d'où le nom, d'ailleurs incorrect, d'"ampérage", par lequel on la désigne souvent dans les ateliers). Elle est symbolisée par la lettre I .

On appelle *intensité du courant de soudage* celle du courant qui traverse l'électrode et la pièce lorsque l'arc est amorcé. Elle est moins élevée que l'intensité du courant d'amorçage ou de court-circuit.

Pour une électrode donnée, la *vitesse de fusion* et par conséquent la rapidité du dépôt augmentent avec l'intensité du courant de soudage.

Pour une *vitesse d'avancement donnée* de l'électrode le long de la ligne à souder, *si l'on augmente l'intensité du courant*, il se dépose donc davantage de métal par unité de longueur ; la *section du cordon* de soudure est *augmentée*. En outre, la quantité de chaleur absorbée par la pièce par unité de longueur étant plus grande, la pièce est plus fortement chauffée et le métal en fusion se trouve porté à température plus élevée. Par suite (*fig.1.5*) :

a) Ce métal est plus fluide : il s'étale davantage et forme un cordon *plus large et plus plat* ;

b) La *pénétration*, c'est-à-dire la profondeur p du bain de fusion formé dans le métal de base, est augmentée.

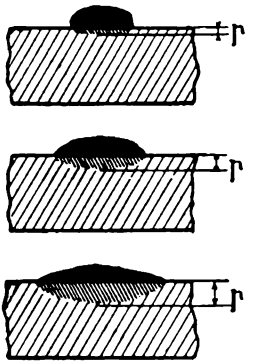


Fig.1.5

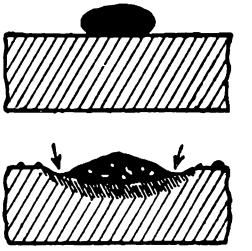


Fig.1.6

Pour une intensité trop faible *ou* un avancement trop rapide, ou les deux, il n'y a donc pas ou presque pas de pénétration et par conséquent pas de liaison véritable entre le métal déposé et le métal de base, mais seulement *collage* du métal d'apport sur la pièce (*fig. 1.6 au-dessus*).

Pour une intensité trop grande *ou* un avancement trop lent, ou les deux, il y a pénétration excessive, formation de *trous* s'il s'agit de pièces minces ou de *morsures* s'il s'agit de pièces moyennes ou épaisses (*fig.1.6, en dessous*). En outre, le métal est *oxydé*, c'est-à-dire partiellement brûlé, l'électrode crépite exagérément, rougit et projette des gouttelettes de métal de part et d'autre du cordon (crachement).

Nous verrons au § 6.5 les règles relatives au choix de l'intensité du courant de soudage.

1.6. Tension d'amorçage et tension d'arc

D'une façon simplifiée, la tension du courant électrique peut être considérée comme la "*pression*" de l'électricité, comme la différence de *niveau électrique* entre deux points d'un circuit. C'est la tension existant entre ces deux points qui provoque le passage du courant lorsque le circuit est fermé ; d'où le nom de "force électromotrice" qui lui est également donné.

La tension se mesure en unités appelées *volts* (d'où le nom de "voltage" souvent utilisé dans les ateliers). Elle est symbolisée par la lettre E .

Pour pouvoir amorcer un arc, la tension entre l'électrode et la pièce doit atteindre une certaine valeur. C'est la *tension d'amorçage* E_a . Elle varie, suivant les électrodes, entre 45 et 100 V. Elle est généralement *plus élevée* pour les électrodes de petit calibre que pour celles de gros diamètre. Une fois que l'arc est amorcé, la tension existant entre l'électrode et la pièce, - *tension aux bornes de l'arc ou tension de régime* E_r - est beaucoup plus faible : de 15 à 45 V suivant le type d'électrode ou le genre de courant. Pour une même électrode, cette tension est d'autant plus faible que l'arc est tenu plus *court*.

1.7. Puissance de l'arc

Pour que l'opération de soudage puisse se poursuivre à vitesse régulière, il est nécessaire que la quantité de chaleur produite dans l'arc par unité de temps soit constante.

Cette quantité de chaleur est proportionnelle à la *puissance de l'arc*, c'est-à-dire au produit de la tension aux bornes de l'arc

par l'intensité du courant de soudage

$$P = E \times I .$$

Lorsque E s'exprime en volts et I en ampères, P s'exprime en *watts*. 1 000 watts = 1 kilowatt.

Ce produit doit donc rester constant, ce qui signifie que lorsque E diminue (raccourcissement de l'arc), I doit augmenter, et inversement.

CHAPITRE 2

LES POSTES DE SOUDAGE

2.1. RÔLE DES APPAREILS OU "POSTES" DE SOUDAGE

Les postes de soudage à l'arc sont des appareils électriques qui ont pour rôle :

a) D'*abaisser la tension* du réseau (le plus souvent 110 ou 220 V) à une valeur égale à la tension d'amorçage nécessaire (45 à 100 V) ;

b) De permettre un *réglage de l'intensité* du courant de soudage ;

c) Généralement, de permettre un réglage de la tension d'amorçage ;

d) D'assurer automatiquement et aussi rapidement que possible le passage de cette tension d'amorçage à la tension d'arc au moment où l'arc s'amorce ;

e) De réaliser des conditions d'alimentation permettant le maintien d'un *arc stable*.

2.2. CARACTÉRISTIQUE PLONGEANTE DE L'APPAREIL DE SOUDAGE

Portons sur un axe horizontal (*fig.2.1*) les valeurs I de l'intensité du courant en ampères, et sur un axe vertical les valeurs E de la tension aux bornes de l'arc, en volts. Nous pourrons, pour le soudage dans des conditions déterminées, indiquer deux points caractéristiques : le premier, B , signifie qu'avant de commencer à souder, c'est-à-dire lorsque le circuit est ouvert, la tension E est maximale (c'est la tension d'amorçage E_a) et l'intensité évidemment nulle ; le second, C , signifie que pour l'intensité I' nécessaire à l'emploi normal de l'électrode choisie, la tension est tombée à une valeur E_r (tension de régime).

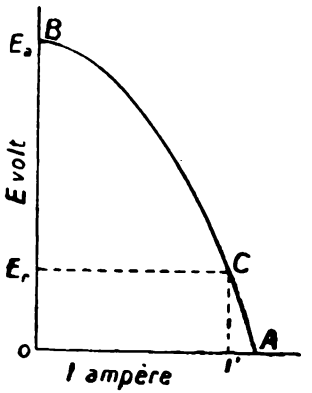


Fig.2.1

Il faut donc que pour passer de l'amorçage au régime de soudage, la tension diminue et l'intensité augmente. Ce passage doit être obtenu très rapidement (quelques centièmes de seconde) par la variation de E suivant une courbe BA . L'allure de cette courbe fait dire que l'appareil de soudage doit posséder une *caractéristique plongeante*.

Seuls les appareils qui possèdent cette caractéristique peuvent être effectivement utilisés pour le soudage à l'arc.

2.3. CONSTITUTION SCHÉMATIQUE GÉNÉRALE D'UNE INSTALLATION DE SOUDAGE

Toute installation de soudage branchée sur un réseau de distribution électrique peut être représentée de façon simplifiée par la *figure 2.2.*

Remarque importante : Les intensités indiquées au poste de soudage (voir § 2.8.e) ne sont obtenues que si la tension de régime est normale. Il faut pour cela éviter toute chute de tension provoquée par des résistances inutiles et par exemple :

a) Eviter l'emploi de câbles exagérément longs (plus de 15 m) ou de section trop faible ; il faut compter, pour des longueurs de moins de 15 m de câble souple allant du poste au porte-électrode ou à la pince de masse :

Jusque $I = 250$ A : câble de 50 mm^2 (section cuivre) ;
Jusque $I = 400$ A : câble de 70 mm^2 (idem) ;
Jusque $I = 550$ A : câble de 95 mm^2 (idem) (1).

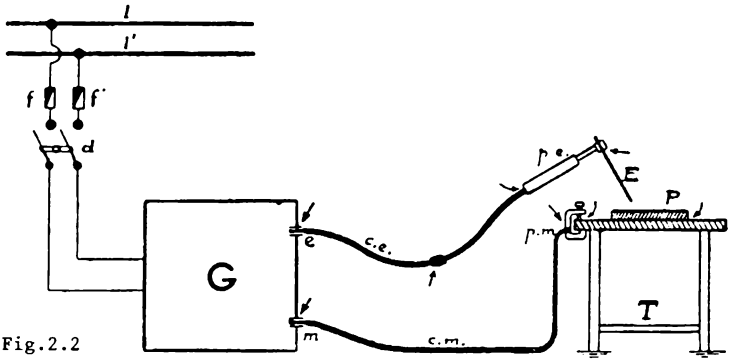


Fig.2.2

ll' = conducteurs d'alimentation.
ff' = fusibles (coupant le courant en cas de surintensité).
d = dispositif d'enclenchement du courant.
G = poste de soudage proprement dit.
e = fiche ou broche "électrode"
m = fiche ou broche "masse".
ce = câble porte-électrode.
cm = câble de masse.
pe = pince porte-électrode.
pm = pince de masse.
P = pièce à souder.
E = électrode.
T = table de soudage.

(Pour le soudage des grandes pièces, la pince de masse est fixée directement sur la pièce à souder).

(1) La vérification de cette section peut s'effectuer approximativement en mesurant le diamètre D du câble dénudé. On doit avoir au moins :

pour section (mm^2)	*... 50*	*... 70*	*... 95*
diamètre D (mm)	*... 9,6*	*... 11,2*	*... 13*

b) S'assurer du bon contact partout où il y a connexion, c'est-à-dire aux endroits indiqués par des flèches sur la *figure 2.2* : connexions des câbles au poste et aux pinces de masse et porte-électrode, épissures éventuelles des câbles, serrage de la pince de masse sur la pièce ou sur la table, (ou même, de préférence, soudure du câble de masse sur la table), contact de l'électrode avec les mâchoires de la pince porte-électrode (maintenir celles-ci en état de propreté).

Tout échauffement anormal en un endroit quelconque du circuit de soudage révèle une chute de tension à laquelle il faut porter remède.

En outre, si l'on travaille sur table, celle-ci doit être maintenue propre et lisse.

2.4. COURANT CONTINU ET COURANT ALTERNATIF

a) Courant continu *(fig. 2.3)*

Si, entre deux bornes *A* et *B* reliées par un conducteur, on maintient une tension constante, il s'écoule entre ces deux bornes un courant d'une intensité constante et toujours de même sens. Ce courant est dit continu. Son sens conventionnel est celui du pôle + (positif) au pôle - (négatif) (1).

Fig.2.3

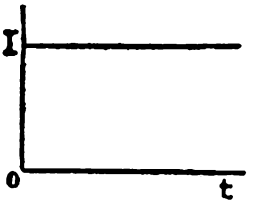


Fig.2.4

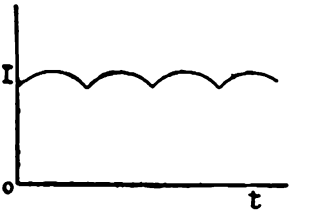


Fig.2.5

Un courant continu se représente graphiquement en fonction du temps *t* , par une droite horizontale (*fig.2.4*) . Il se définit uniquement par son *intensité I* .

Le courant fourni par les redresseurs à vapeur de mercure ou les redresseurs secs (p.24), n'est pas à proprement parler un courant continu, mais un courant *ondulé* (*fig.2.5*). Il peut cependant, du point de vue du soudage, être assimilé au courant continu.

---

*(1) Suivant la théorie moderne de l'électricité, ce courant résulte d'un "flux", c'est-à-dire d'un écoulement, de particules appelées "électrons * " du pôle - au pôle + , soit en sens inverse du courant conventionnel classique.*

b) Courant alternatif *(fig. 2.6)*

Si deux bornes *A* et *B* sont reliées par un conducteur et si chacune d'elles possède une tension alternativement positive et négative par rapport à l'autre, il s'écoule entre ces deux bornes un courant qui change de sens à la même cadence et qui est appelé courant alternatif. Les deux pôles *A* et *B* (±) sont alors équivalents.

Fig.2.6

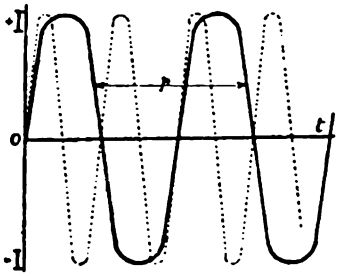


Fig.2.7

Un courant alternatif se représente graphiquement, en fonction du temps, par une ligne sinueuse (*fig.2.7*). Il se définit à la fois :
a) Par son *intensité* ("efficace", c'est-à-dire celle d'un courant continu qui produirait le même effet) ;
b) Par sa cadence de changement de sens ou *fréquence* *n* (nombre de *cycles* par seconde); la *période* *p* est la durée d'un cycle et s'exprime en secondes par l'inverse de la fréquence. A titre d'exemple, sur la *figure 2.7*, le courant représenté en pointillés possède une fréquence double de celle du courant figuré en trait plein, et sa période est deux fois plus courte.

Les courants industriels ont des fréquences de 25, 50 ou 150 hertz (150 Hz) ou cycles par seconde. Sur les plaques d'identification des machines électriques à courant alternatif, la fréquence est indiquée par le signe ∿.

Pour le soudage, plus la fréquence est élevée et plus l'arc est stable. On ne pourrait pas souder avec du courant à 25 Hz (courant dont on perçoit les oscillations dans une lampe, par le tremblement de la lumière produite). Par contre, on soude assez facilement avec du courant à 50 Hz et mieux encore avec du courant à 150, 180, 240 ou 450 Hz (moyenne fréquence).

2.5. Haute fréquence

Un courant alternatif dont la fréquence atteint 100 000 à 500 000 Hz possède la très intéressante propriété d'ioniser * énergiquement l'espace compris entre l'extrémité de l'électrode et le bain de fusion.

La production d'un tel courant pour le soudage lui-même, aux intensités qui sont nécessaires pour celui-ci, est cependant impraticable. Mais on a tourné la difficulté en superposant, au courant de soudage alternatif à fréquence normale, un courant alternatif à haute

fréquence sous très haute tension (1) et à très faible intensité, qui suffit à produire et à maintenir l'ionisation voulue.

L'*étincelle-pilote* ainsi constamment produite facilite le maintien de l'arc et surtout, permet son amorçage par simple rapprochement et sans qu'un contact électrode-pièce soit nécessaire.

Ce système (voir § 2.8, page 26) est assez employé à l'heure actuelle, notamment pour le soudage en courant alternatif des métaux qui nécessitaient habituellement l'usage du courant continu. D'autre part, il est fréquemment utilisé pour l'application en courant alternatif de procédés spéciaux comme le soudage à l'argon (v. chapitres 17 et 18).

2.6. DÉPHASAGE DU COURANT ALTERNATIF, FACTEUR DE PUISSANCE (COSINUS PHI).

Lorsque le circuit d'un courant alternatif comporte des enroulements, et tout particulièrement des enroulements bobinés sur des noyaux métalliques, comme c'est le cas pour les transformateurs statiques (§ 2.8), il se produit un phénomène appelé *self-induction* (*induction propre*) qui a pour effet de faire retarder les variations de l'intensité I sur celles de la tension E (*fig.2.8*). Ce retard représente une certaine fraction de la période p . On l'appelle *déphasage*.

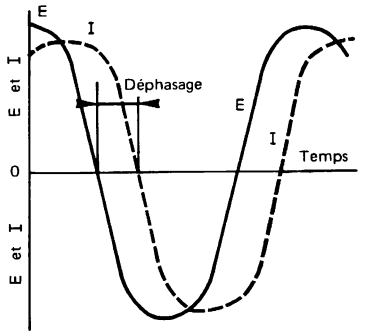


Fig.2.8

Dans ce cas, les valeurs de E et de I n'atteignant pas leur maximum au même instant, le produit

$$P = E \times I \qquad (\S\ 7)$$

ne représente plus que la *puissance apparente* P_{app} utilisée. La puissance *active* ou *effective* P_{eff} est plus faible. Elle est égale à la puissance apparente P_{app} multipliée par un facteur plus petit que 1 , qu'on appelle *facteur de puissance*, et qui dépend des caractéristiques du circuit.

Pour des raisons que nous ne pouvons développer ici, ce facteur de puissance est souvent désigné par cos ϕ (cosinus phi) et est indi-

(1) Même sous de très fortes tensions, les courants à haute fréquence, d'ailleurs utilisés en thérapeutique, sont sans danger pour l'organisme.

qué de cette manière sur les plaques d'identification des appareils à courant alternatif. On a donc :

$$P_{eff} = P_{app} \times \cos \phi$$

La puissance apparente $P_{app} = E \times I$ s'exprime, non pas en watts, mais en *volts-ampères* (VA) ou en *kilovolts-ampères* (1 kVA = 1 000 VA).

Elle est importante à connaître, car *c'est d'elle, et non pas de la puissance effective, que dépendront les caractéristiques (diamètre et isolement) à donner aux câbles d'alimentation de l'appareil de soudage.*

Par exemple, considérons deux consommateurs alimentés en courant alternatif 220 V et dont les installations possèdent toutes deux la même puissance effective, soit 24 kW (24 000 W).

Supposons que l'installation du premier consommateur, A , possède un facteur de puissance $\cos \phi = 0{,}8$ et celle du second, B , $\cos \phi = 0{,}6$.

La puissance apparente sera,

$$\text{pour A : } \frac{24\ 000}{0{,}8} = 30\ 000 \text{ VA}$$

$$\text{et pour B : } \frac{24\ 000}{0{,}6} = 40\ 000 \text{ VA.}$$

Par suite, les câbles alimentant l'installation de A devront être prévus pour

$$\frac{30\ 000}{220} = 136 \text{ A}$$

et ceux alimentant l'installation de B , pour

$$\frac{40\ 000}{220} = 182 \text{ A.}$$

Pour une consommation, en watt-heures, *égale* chez ces deux clients, la compagnie productrice d'énergie électrique devra donc envoyer un courant plus intense chez le second et, par suite, disposer de machines plus puissantes, de câbles plus forts, etc...

Il en résulte que les compagnies ont intérêt à n'avoir que des clients tels que A qui utilisent des machines à bon facteur de puissance. C'est pourquoi elles pénalisent les consommateurs dont les installations possèdent un faible facteur de puissance et souvent les obligent même à prendre des dispositions pour relever ce facteur.

2.7. Courants triphasés, équilibrage des phases

Lorsque le courant alternatif est amené à un appareil sur deux conducteurs (comme du courant continu), on dit qu'il est *monophasé*.

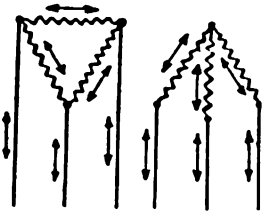


Fig.2.9 et 2.10

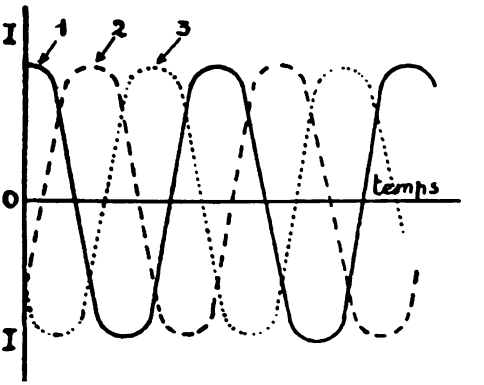


Fig.2.11

Mais le courant alternatif est fréquemment fourni par les centrales suivant une disposition particulière qui présente certains avantages. Trois câbles ou conducteurs sont amenés chez l'utilisateur ; chacun d'eux est relié à la centrale (1) à un alternateur "triphasé" tel que si, chez l'utilisateur, on raccorde les trois conducteurs suivant la disposition de la *figure 2.9* (triangle) ou de la *figure 2.10* (étoile) il circule dans les trois conducteurs trois courants alternatifs de même fréquence mais qui sont déphasés, l'un par rapport à l'autre, d'un tiers de période (*fig.2.11*).

Cette combinaison est dite *triphasée*.

Les valeurs des tensions et des intensités des trois courants ne sont pas les mêmes pour la disposition en triangle et celle en étoile. Les appareils récepteurs triphasés (moteurs, transformateurs, etc..) portent sur leur plaque d'identification l'indication Δ (triangle) ou ☆ (étoile) qui permet à l'utilisateur de savoir comment l'appareil doit être raccordé.

On dit que les *phases* sont *équilibrées* lorsque les résistances intercalées sur chacune d'elles sont équivalentes. A cette condition seulement, les courants circulant dans les trois fils de ligne et les quantités d'énergie consommées dans ces trois fils sont les mêmes.

Il est nécessaire, pour le bon fonctionnement des alternateurs industriels et des réseaux de distribution, que cette condition soit pratiquement obtenue. Les compagnies productrices de courant l'exigent généralement dans leurs contrats avec les consommateurs.

---

(1) Directement ou le plus souvent par l'intermédiaire de transformateurs.

2.8. CHOIX DU POSTE DE SOUDAGE

La description détaillée des principaux types de postes de soudage à l'arc sortirait du cadre du présent ouvrage. Nous n'en ferons qu'une description sommaire, car l'installation des postes et leur dépannage est du ressort de l'électricien et non de celui du soudeur.

Remarque préalable. - L'utilisation du courant continu peut être généralement considérée comme préférable en raison de la parfaite stabilité de l'arc en continu et du champ d'application plus étendu du soudage en continu.

Il faut cependant mentionner, au passif de l'emploi du courant continu, les phénomènes de "soufflage magnétique" de l'arc, qui gênent parfois l'exécution de certains travaux tels que le dépôt de cordons d'angle.

D'ailleurs, à l'heure actuelle, les ateliers sont de plus en plus souvent alimentés en courant alternatif. L'emploi du continu est en régression, surtout depuis que l'adjonction de générateurs à haute fréquence (§ 2.5) au poste de soudage a permis de souder les aciers inoxydables.

Le choix d'un poste de soudage est déterminé par les facteurs suivants :

a) La puissance électrique nécessaire ;
b) La nature de la force motrice dont on dispose ;
c) Les conditions d'utilisation ;
d) Les exigences de la compagnie distributrice d'électricité ;
e) Le mode de réglage du courant de soudage.

A) LA PUISSANCE ÉLECTRIQUE NÉCESSAIRE

On peut considérer trois groupes d'appareils de soudage :

a) *Les postes légers* pouvant souder avec des électrodes de diamètre allant jusqu'à 3,25 mm inclusivement (I < 150 A, voir § 5.3). Puissance minimale nécessaire 5 kW ;

b) *Les postes normaux* (les plus courants) pouvant souder avec des électrodes de diamètre allant jusqu'à 5 mm et occasionnellement, c'est-à-dire pendant moins d'une heure consécutivement, avec des électrodes de 6,3 mm (I < 250 ou 300 A). Puissance minimale nécessaire : 8 à 10 kW ;

c) *Les postes à grande puissance* pouvant souder avec des électrodes de diamètre allant jusqu'à 8 mm ou pouvant alimenter deux ou plusieurs soudeurs (I pouvant atteindre 600 A et même davantage). Puissance minimale nécessaire : 18 kW .

B) LA NATURE DE LA FORCE MOTRICE DONT ON DISPOSE

On ne dispose pas de force motrice électrique pour la puissance nécessaire.

Il faut alors installer un *groupe électrogène* constitué par un moteur, généralement à essence ou à huile lourde (Diesel) mais pouvant aussi être à gaz ou même à vapeur, et qui entraîne une *dynamo de soudage* (*fig.2.12*).

Cette dynamo de soudage est une machine spéciale, différente des dynamos pour autres usages. Elle est combinée de façon que si on la fait débiter sur une résistance variable telle qu'un arc de soudage, sa tension aux bornes diminue lorsque l'intensité du courant de soudage

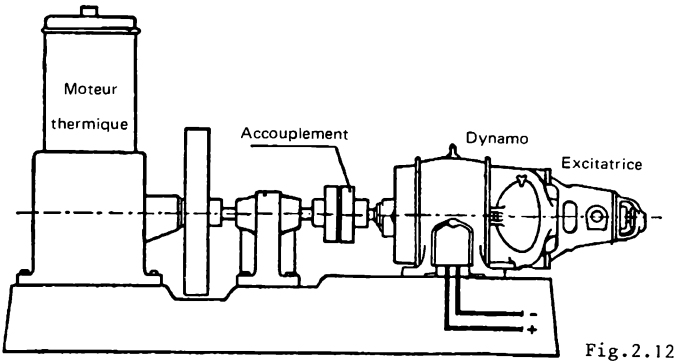


Fig.2.12

augmente, et inversement. Le courant obtenu lorsque la dynamo est en court-circuit (amorçage de l'arc, § 1.4) est de ce fait limité à une valeur admissible. On obtient ainsi la *caractéristique plongeante* dont nous avons expliqué la nécessité au § 2.2.

Eventuellement, le réglage de la tension à vide de la dynamo s'effectue au moyen d'un rhéostat de champ ou d'excitation.

Quant au réglage du courant de soudage, il peut s'effectuer :

Soit par la manoeuvre d'un *rhéostat de réglage* branché sur le circuit de soudage (réglage généralement par échelons, voir E) ;

Soit par un *volant* permettant de faire varier la position des balais sur le collecteur (réglage généralement continu, voir E).

On dispose, pour la puissance nécessaire, de courant continu (tension 110 à 500 V).

On utilise alors un *groupe rotatif autorégulateur de soudage en courant continu.*

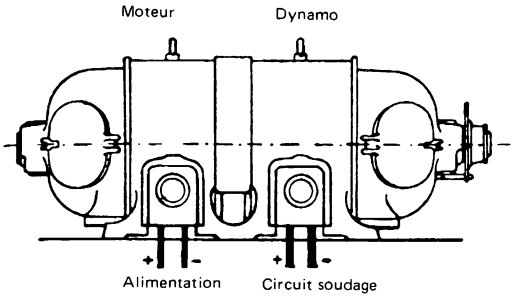


Fig.2.13

Ce groupe consiste en un moteur à courant continu prévu pour la tension de la ligne, accouplé à une dynamo de soudage telle que nous venons de la décrire.

De tels groupes, généralement coûteux d'achat et d'entretien, peuvent se présenter sous la forme de deux machines séparées, accouplées en bout d'arbre, ou bien sous la forme d'un ensemble monobloc (*fig.2.13*). Plus léger, il peut être monté sur chariot et est alors relativement transportable.

On dispose, pour la puissance nécessaire, de courant alternatif (tension 110 à 500 V) mais les travaux envisagés exigent l'emploi d'un courant de soudage continu.

Les différentes possibilités sont alors les suivantes :

- Appareils rotatifs

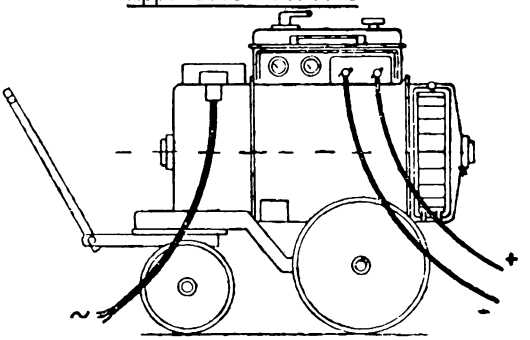


Fig.2.14

- Les *groupes convertisseurs*, consistant en un moteur à courant alternatif, le plus souvent triphasé, accouplé à une dynamo de soudage (voir A). L'appareil est souvent réalisé sous la forme d'un ensemble monobloc (*fig.2.14*). Les deux circuits, alternatif et continu, sont entièrement séparés l'un de l'autre. Ces appareils sont relativement lourds, d'achat et d'entretien coûteux et d'un assez faible rendement.

- Les *commutatrices de soudage*, combinaison en une seule machine des deux machines ci-dessus, et dans lesquelles les circuits alternatif et continu ne sont pas séparés. Les commutatrices sont plus légères et possèdent un meilleur rendement que les groupes convertisseurs mais sont d'une réparation plus délicate en cas d'avarie.

- Appareils statiques (c'est-à-dire sans organes tournants). Ce sont les *redresseurs* de courant, appareils contenant des organes qui ne laissent passer le courant que dans un sens. Une seule des deux alternances du courant alternatif traverse donc l'appareil, l'autre est arrêtée. On obtient ainsi un courant *ondulé* (*fig.2.5*) .

On distingue :

- Les *redresseurs à tubes électroniques*, genre Tungar, contenant des tubes un peu analogues aux tubes de radio, relativement délicats et qui doivent être remplacés plus ou moins fréquemment. C'est pour limiter l'usure de ces tubes qu'on a réalisé des *postes bi-courant* pouvant fonctionner suivant les besoins :

Soit comme redresseurs (triphasés-continus) ;

Soit comme transformateurs statiques monophasés (voir plus loin).

Citons parmi les appareils de la catégorie des redresseurs à tubes, les redresseurs à cellules au sélénium ou au silicium, les plus répandus à l'heure actuelle, qui comportent des diodes refroidies par air forcé. Leur champ d'application est très étendu et il en existe qui sont prévus pour deux soudeurs.

- Les *redresseurs secs* tels que ceux à l'oxyde de cuivre (oxymétal) nécessitant moins de précautions et de surveillance.

Ces appareils sont notamment utilisés pour le soudage des tôles minces.

On dispose, pour la puissance nécessaire, de courant alternatif (tension 110 à 500 V) et les travaux envisagés permettent l'emploi d'un courant de soudage alternatif.

Ce cas est le plus fréquent à l'heure actuelle.

On rencontre les appareils suivants :

- Appareils rotatifs. Leur type est le *groupe convertisseur de fréquence*. Il consiste en un ensemble, généralement monobloc, d'un moteur triphasé entraînant un alternateur monophasé à fréquence augmentée. On passe ainsi par exemple, de 50 Hz à 150 Hz, ce qui permet d'augmenter la stabilité de l'arc (voir § 2.4.b).

Cette stabilité est encore mieux assurée, à l'heure actuelle, par les groupes convertisseurs à moyenne fréquence (450 Hz).

- Appareils statiques. Ce sont les transformateurs statiques, appareils de soudage les plus répandus.

- *Transformateurs statiques monophasés simples.* - Leurs organes essentiels sont les suivants (*fig.2.15*) :

Un noyau magnétique N, constitué par un empilage de tôles et sur lequel sont montés :

un enroulement *primaire*, raccordé à ses deux bornes au réseau d'alimentation ;

un enroulement *secondaire*, raccordé à ses deux bornes au circuit de soudage.

Les deux enroulements sont parfaitement isolés l'un de l'autre et chacun d'eux par rapport au noyau, de façon à constituer deux circuits électriquement indépendants.

Lorsque le circuit de soudage est fermé, la variation du flux magnétique * dans le noyau, due aux alternances du courant alternatif primaire, développe par induction * dans le circuit de soudage un courant de même fréquence mais dont la tension est abaissée et l'intensité augmentée par suite de la différence des nombres de spires dans chaque enroulement.

L'appareil est complété par un système de réglage qui peut être une *inductance* * ou bobine de self (*fig.2.16*) (transformateur à tension secondaire constante et inductance de réglage) ou bien un 3ème enroulement dit *tertiaire* monté sur le noyau (transformateur autorégulateur).

Un autre système de réglage appelé "shunt magnétique" consiste (*fig.2.17*) à dériver une plus ou moins grande partie du flux magnétique du noyau dans une partie de l'armature non pourvue d'enroulements On diminue ainsi le flux magnétique secondaire et par conséquent aussi la tension au secondaire. Le réglage s'effectue alors au moyen d'un volant.

Ces différentes dispositions aboutissent au même résultat qui est l'obtention de la caractéristique plongeante de l'appareil (§ 2.2).

Les transformateurs monophasés sont des appareils légers et

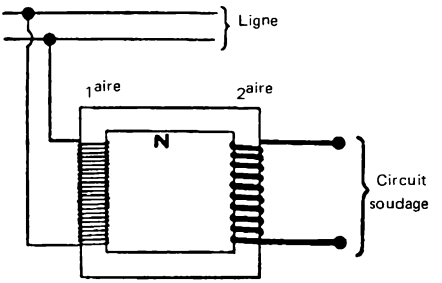


Fig.2.15

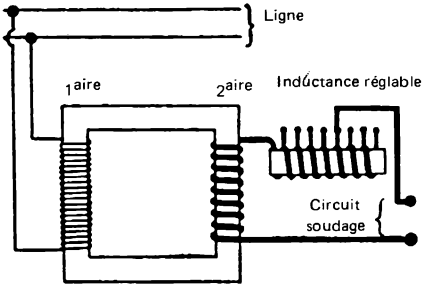


Fig.2.16

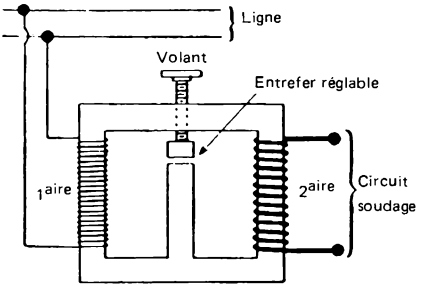


Fig.2.17

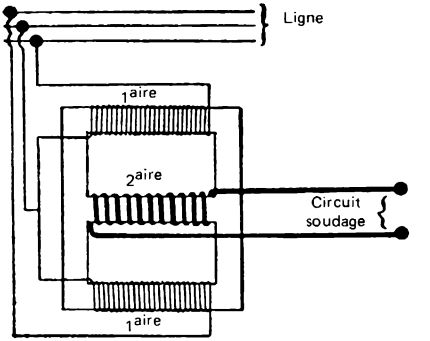


Fig.2.18

très simples, d'un très bon rendement, ne comportant aucun organe fragile et ne demandant que peu d'entretien. Leur facteur de puissance est par contre assez faible (voir D)

Ils peuvent se brancher :

Soit sur une distribution monophasée (à deux conducteurs) ;

Soit sur deux des trois conducteurs, c'est-à-dire "sur une phase", d'une distribution triphasée.

- *Transformateurs statiques monophasés compensés.* - Ils comportent, en plus des organes des appareils précédents, une batterie de condensateurs * qui, en réduisant le déphasage (§ 2.6) permettent de relever le facteur de puissance. Cet avantage est cependant obtenu au détriment du poids et du prix d'achat de l'appareil.

- *Transformateurs statiques trimonophasés.* - Leur but est de transformer le courant triphasé du réseau en un courant monophasé approprié au soudage.

Ces appareils sont d'un principe analogue à celui des transformateurs monophasés. La différence essentielle entre les deux types d'appareils est que le monophasé comporte un enroulement primaire simple, tandis que le trimonophasé possède au primaire une combinaison d'enroulements raccordés par trois câbles d'alimentation au réseau triphasé (*fig.2.18*).

La combinaison de ces enroulements primaires par rapport à l' enroulement secondaire est réalisée de telle façon qu'il passe dans les trois câbles d'amenée du courant au transformateur trois courants dont les intensités sont entre elles comme 1,2 et 1 . L'usage de ces appareils, d'ailleurs lourds et coûteux, semble condamné, car ils prennent sur la phase la plus chargée une intensité de 15% supérieure à celle demandée par un appareil monophasé répondant aux mêmes conditions de soudage (1).

- *Transformateurs statiques trimonophasés compensés.* - Ils comportent en plus une batterie de condensateurs qui joue le même rôle que pour les monophasés compensés.

<u>On dispose, pour la puissance nécessaire, de courant alternatif (tension 110 à 500 V) et les travaux envisagés peuvent s'effectuer, à défaut de courant continu, grâce à l'adjonction au transfo statique d'un générateur à haute fréquence.</u>

Nous avons déjà exposé au § 2.5 l'intérêt de l'emploi d'un courant à haute fréquence produisant une étincelle-pilote.

Un type de générateur à haute fréquence pris comme exemple (*fig.2.19*) comporte essentiellement :

---

(1) Suivant la Norme française NF 85-011 de mars 1974.

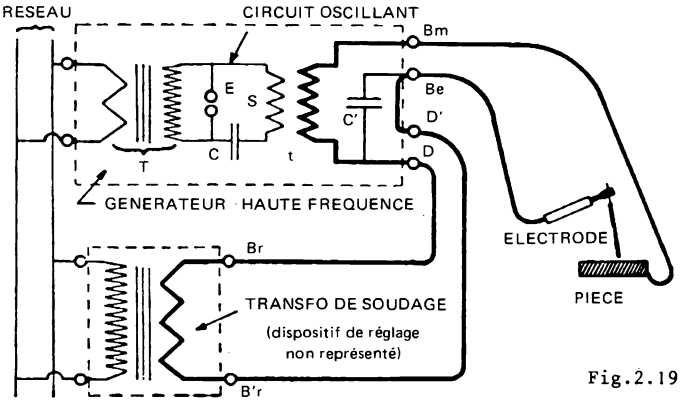


Fig.2.19

- Un transformateur auxiliaire à haute tension T dont le primaire est relié au réseau monophasé.
- Un circuit oscillant constitué par la bobine secondaire de ce transfo, un condensateur C, un éclateur * E et une inductance (self) S.
- Un transformateur Tesla (sans noyau) t, dont le primaire est constitué par l'inductance ci-dessus, et dont le secondaire fait partie du circuit de soudage.
- Un (ou plusieurs) condensateurs C' de protection du circuit de soudage, en parallèle dans ce circuit.

Les bornes B_r et B'_r sont celles de sortie du transfo de soudage ; elles sont raccordées respectivement aux bornes D et D' du générateur à haute fréquence. Les bornes B_e et B_m sont les bornes de sortie de ce générateur ; elles sont raccordées respectivement au porte-électrode et à la masse.

Le courant circulant dans le circuit oscillant est à haute tension (7 à 8 000 V) et à haute fréquence (300 000 Hz). Il superpose, par induction, au courant de soudage, un courant à haute fréquence qui donne lieu à la production de l'étincelle-pilote dont nous avons expliqué le rôle au § 2.5.

c) Les conditions d'utilisation

Les appareils de soudage peuvent être portatifs, transportables ou fixes.

Les appareils *portatifs*, qui sont tous des appareils pour travaux légers (I,a) possèdent des poignées ou des brancards et éventuellement des crochets d'élingage. Ils pèsent de 60 à 100 kg environ.

Les appareils *transportables*, - les plus courants, - sont montés sur un chariot et traînés par un ou deux brancards. Leur poids

varie depuis une centaine de kg pour les transformateurs statiques monophasés normaux jusqu'à 500 à 600 kg pour les postes statiques à grande puissance ou les groupes convertisseurs ou à courant continu.

Suivant le poids de ces appareils, les chariots qui les portent sont à :

Deux roues, avec une ou deux béquilles.

Trois roues, dont une généralement pivotante.

Quatre roues, soit avec un essieu fixe et un essieu pivotant, soit avec deux essieux fixes.

Attirons l'attention sur la nécessité pour les appareils sur chariot d'avoir leur centre de gravité aussi bas que possible pour éviter le renversement lors du roulage, et également sur l'intérêt des roues de diamètre relativement grand et des roues ou essieux pivotants, qui facilitent le transport sur les chantiers, les cours d'usine possédant des voies ferrées, etc...

Enfin, les postes *fixes* sont ceux dont le poids dépasse 600 à 700 kg. Ils sont, soit installés à demeure dans l'atelier, soit montés sur wagon, lorry, camion ou remorque autotractée.

En ce qui concerne le *degré de protection* des organes de l'appareil de soudage, on distingue les présentations suivantes :

Appareils ouverts, pour travail en atelier seulement, en général peu recommandables (poussières, faible sécurité) ;

Appareils abrités ou protégés, pour travail en atelier ou sur chantiers peu exposés aux intempéries ;

Appareils fermés, pour travail sur chantiers exposés ;

Appareils étanches, pour travail en atmosphère riche en poussières (carrières, cimenteries, etc...) ou susceptibles d'être mouillés (sur navires, etc...);

Appareils hermétiques, pour même cas que ci-dessus et atmosphères corrosives.

D) Les exigences de la compagnie distributrice d'électricité

Celles-ci ne concernent que les distributions en courant alternatif et portent sur deux points :

- Le facteur de puissance ;
- L'équilibrage des phases du réseau triphasé.

Nous renvoyons aux §§ 2.6 et 2.7 pour l'exposé des inconvénients rencontrés.

Nous donnerons ci-après, à titre indicatif, les facteurs de puissance habituels des principaux types de postes alimentés en alternatif (pour le courant correspondant au régime maximal) :

Groupes convertisseurs	0,70 à 0,90
Redresseurs	0,70 à 0,95
Convertisseurs de fréquence	0,70 à 0,75
Transformateurs monoph. simples	0,30 à 0,55
Transformateurs monoph. compensés	0,70 à 0,90
Transformateurs trimonoph. simples	0,25 à 0,60
Transformateurs trimonoph. compensés	0,70 à 0,90

En ce qui concerne l'équilibrage des phases, nous rappellerons qu'il est obtenu avec les groupes convertisseurs triphasés continus, les redresseurs triphasés et les convertisseurs de fréquence. Il est seulement partiel avec les transformateurs statiques trimonophasés et n'est pas du tout réalisé avec les transformateurs monophasés.

E) LE MODE DE RÉGLAGE DU COURANT DE SOUDAGE

Dans la plupart des types d'appareils que nous avons passés en revue, on peut rencontrer, suivant la construction du poste et de ses accessoires, deux catégories d'appareils qui diffèrent par leur mode de réglage du courant :

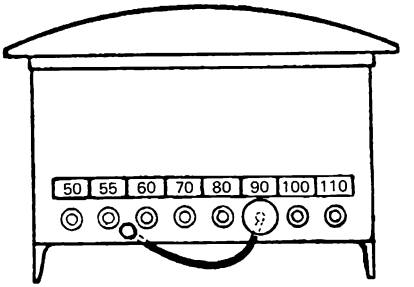


Fig.2.20

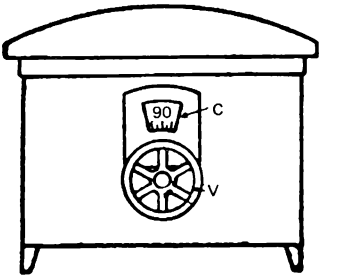


Fig.2.21

Ceux à *réglage par échelons* (*fig.2.20*) par bornes ou par douilles. Ils portent un certain nombre de bornes ou de douilles à chacune desquelles correspond une intensité déterminée (1) ; le système par douilles est le plus pratique, car il suffit d'enfoncer une broche dans la douille choisie pour obtenir l'intensité correspondante, qui est indiquée sur le poste, soit directement en ampères, soit indirectement, par le diamètre d'électrode correspondant. Le réglage de l'intensité est d'autant plus précis que les échelons ainsi réalisés sont plus rapprochés l'un de l'autre. Pratiquement, si les intensités s'échelonnent de 5 en 5 ampères jusqu'à 60-70 ampères et de 10 en 10 entre 60-70 et 250-300, ce réglage vaut le réglage continu.

Ceux à *réglage continu* (*fig.2.21*) par volant ou manivelle, système toujours utilisé pour les transfos statiques à shunt magnétique

(1) Ou bien dont les combinaisons deux par deux au moyen d'une fiche bipolaire permet d'obtenir un certain nombre d'intensités différentes.

(*fig.2.17*). Les variations d'intensité s'obtiennent par la manoeuvre d'un volant *V* ou d'une manivelle et s'indiquent sur un tambour ou sur un cadran *C* . Ce réglage est toujours précis en raison du déplacement progressif des organes qui le commandent. Un dispositif de blocage du volant ou de la manivelle doit être cependant prévu afin d'éviter que ces organes ne se déplacent d'eux-mêmes en raison des actions électro-magnétiques se produisant à l'intérieur du poste ; bien entendu, ce blocage doit pouvoir se faire pour n'importe quelle position du volant et non suivant des encoches, car dans ce dernier cas le réglage perdrait précisément sa continuité.

Remarque sur le réglage de la tension d'amorçage. Beaucoup de postes de soudage possèdent, outre les dispositifs de réglage de l'intensité, un réglage de la tension d'amorçage à deux ou trois valeurs différentes. Le poste peut ainsi être approprié le mieux à l'emploi de certaines électrodes, celles présentant des difficultés d'amorçage (faibles diamètres notamment) nécessitant une tension d'amorçage plus élevée. Nous attirons l'attention sur cette possibilité de réglage, souvent négligée ou même ignorée par les soudeurs.

CHAPITRE 3

LES ÉLECTRODES ET LE MATÉRIEL ACCESSOIRE

3.1. ELECTRODES NUES

Les électrodes nues sont constituées par une simple baguette métallique de composition appropriée à celle du métal à souder. A l'heure actuelle, elles ne sont pratiquement plus employées.

En effet, elles ne peuvent conduire à des soudures de qualité pour les raisons suivantes :

- L'arc vacille en tous sens et la conduite du bain de fusion s'en trouve rendue difficile ;
- Au cours de son passage dans l'arc, surtout si celui-ci se trouve accidentellement allongé, le métal porté à très haute température est sujet à des altérations par les gaz de l'air : oxygène et azote. L'oxygène l'oxyde et rend le dépôt plus ou moins *poreux* (soudures non étanches) ; l'azote le "nitrure" en le rendant *dur* et *cassant* ;
- Cette dernière altération se trouve aggravée par le refroidissement très rapide du métal déposé, qui conduit à des effets de *trempe*.

3.2. ELECTRODES ENROBÉES

Les électrodes enrobées (*fig.3.1*) sont constituées par une baguette métallique appelée *âme A*, entourée d'une gaine plus ou moins épaisse de matières généralement non métalliques, d'une composition complexe, appelée *enrobage*, *E*.

L'extrémité de l'électrode est dénudée sur quelques centimètres afin de permettre le contact avec les mâchoires de la pince porte-électrode.

Les électrodes enrobées sont d'un usage généralisé en courant alternatif comme en courant continu.

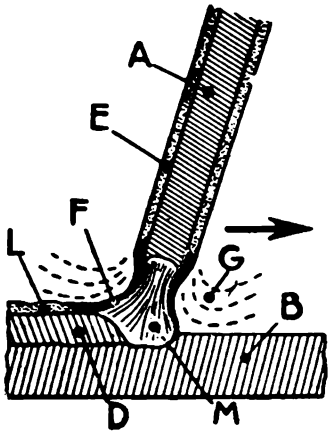


Fig.3.1

Le rôle de l'enrobage est multiple. Principalement :
a) Il *dirige* l'arc *M* dans le prolongement de l'électrode et permet de conduire convenablement le bain de fusion ;
b) Il facilite l'*amorçage* de l'arc en favorisant l'ionisation * (§ 1.4) ;
c) Il *stabilise* l'arc et permet l'emploi du courant alternatif dont on dispose le plus fréquemment ;
d) Il *protège* le métal vis-à-vis de l'oxygène et de l'azote de l'air pendant son passage de l'électrode à la pièce ;
e) Il forme une scorie plus légère que le métal, le *laitier*, *L* , qui joue un rôle d'*affinage* du bain de fusion en assurant l'élimination des impuretés et des éléments nuisibles à la qualité du métal déposé ;
f) Dans certains cas, il permet l'incorporation au métal déposé d'éléments *améliorants* ; nous verrons d'ailleurs que certains enrobages très épais contiennent même une assez grande proportion de poudre de fer qui contribue à l'apport de métal ; nous verrons en outre notamment à propos des aciers fortement alliés (inoxydables, § 11.5) qu'il existe même des électrodes dont l'âme est constituée d'acier doux et dont l'enrobage contient la totalité des éléments d'alliage nécessaires.
g) Le laitier forme à la surface du cordon de soudure *D* une couverture plus ou moins continue qui le préserve de l'action de l'air et *ralentit son refroidissement*, facilitant ainsi l'élimination des gaz dissous par le métal en fusion.

3.3. Dimensions des électrodes

Le diamètre indiqué pour les électrodes enrobées est toujours, bien entendu, celui de l'âme. Les diamètres des électrodes commerciales sont les suivants, en mm (entre parenthèses les diamètres peu courants en soudure manuelle) :

(1,2) - 1,6 - 2 - 2,5 - 3,25 - 4 - 5 - 6,3 - (8) - (10) - (12).

Les longueurs normales des électrodes sont les suivantes :

Ø 1,2 mm : 150 mm
Ø 1,6 mm : 225 mm
Ø 2 mm
Ø 2,5 mm : 350 mm
Ø 3,25 mm et plus : 450 mm .

3.4. Epaisseur de l'enrobage

Suivant l'épaisseur de l'enrobage, on distingue :

a) Les électrodes à enrobage *mince* ;
b) Les électrodes à enrobage *semi-épais* ;
c) Les électrodes à enrobage *épais*.

Le tableau I indique dans laquelle de ces catégories doit se classer une électrode, suivant le diamètre d de l'âme et le diamètre extérieur D de l'enrobage (en mm) :

TABLEAU I

Diam. d	D Enrob.mince	D Enr.1/2 épais	D Enr. épais
1,2	1,3 à 1,4	1,4 à 1,9	plus de 1,9
1,6	1,7 à 1,8	1,8 à 2,5	" " 2,5
2	2,2 à 2,4	2,4 à 3,1	" " 3,1
2,5	2,7 à 3	3 à 3,9	" " 3,9
3,25	3,5 à 3,9	3,9 à 5	" " 5
4	4,4 à 4,8	4,8 à 6,2	" " 6,2
5	5,5 à 6	6 à 7,7	" " 7,7
6,3	6,9 à 7,6	7,6 à 9,8	" " 9,8
8	8,8 à 9,6	9,6 à 12,4	" " 12,4
10	11 à 12	12 à 15,5	" " 15,5
12	13,2 à 14,4	14,4 à 18,6	" " 18,6

Pour une même composition d'enrobage, la qualité du métal déposé est d'autant *meilleure* que l'enrobage est *plus épais*. A l'heure actuelle, pour les travaux de qualité on n'emploie plus que des électrodes à enrobage semi-épais ou épais.

Une qualité à exiger de *toutes* les électrodes enrobées est le centrage convenable de l'âme par rapport à l'enrobage. Un mauvais centrage provoque en effet lors du soudage la formation d'un bec ou biseau, qui gêne l'opération.

Le contrôle du centrage et les méthodes de ce contrôle sont prévus dans la Norme française A 81-309.

L'enrobage des électrodes s'effectue, soit par trempage des baguettes dans une pâte de composition appropriée, soit par *extrusion*, c'est-à-dire passage des baguettes dans une machine spéciale qui les entoure de pâte et donne à l'enrobage une surface parfaitement cylindrique. Les électrodes extrudées sont à l'heure actuelle presque exclusivement utilisées.

3.5. Choix de l'électrode

Bien que la question du choix de l'électrode soit très complexe et appartienne au domaine de l'ingénieur soudeur, il est nécessaire que le personnel de maîtrise et même le soudeur en possèdent une notion claire et précise.

Nous traiterons successivement :

a) Des propriétés mécaniques du métal déposé ;
b) Des caractéristiques d'utilisation ;
c) Des caractéristiques économiques ;
d) Des différentes propriétés des enrobages ;
e) De leur classification.

a) Les propriétés mécaniques du métal déposé.

Les fabricants d'électrodes garantissent, pour le métal déposé à plat dans des conditions normales, des caractéristiques mécaniques déterminées, qui sont :

- La *charge de rupture* ou *résistance à la traction* (R) , exprimée en newtons par mm^2 (N/mm^2) * ;
- L'*allongement* (A%) caractérisant sa ductilité * et mesuré sur une longueur égale à 5 fois le diamètre de l'éprouvette ;
- La *résilience* (ρ) caractérisant sa résistance au choc, mesurée sur éprouvette U.F. et actuellement exprimée en joules par cm^2 (J/cm^2) (1) ;
- La *dureté* (Δ) exprimée en unités Brinell, Rockwell ou Vickers;
- La *limite élastique* *(L) exprimée en N/mm^2 , qui constitue une très intéressante indication sur l'indéformabilité du joint pour les fatigues élevées ;
- La *capacité de pliage* sur poinçon ayant deux ou trois fois l'épaisseur de l'éprouvette ;
- La *forgeabilité*, c'est-à-dire la déformabilité à la température du rouge clair.

Pour les aciers non alliés ou faiblement alliés, c'est-à-dire ceux dans lesquels aucun élément d'addition n'atteint la teneur de 5%, la Norme française NFA/81-309 de déc. 1962 fixe comme suit les valeurs minimales des caractéristiques mécaniques exigées pour chaque qualité d'électrode, ainsi que la couleur conventionnelle fondamentale qui doit être apportée sur l'extrémité de chaque baguette (2) :

TABLEAU 2

Symbole	Couleur Fondamentale	R (N/mm^2)	A %	Résilience (J/cm^2)
0	-	-	-	-
1	-	410	14	50
2	rouge	440	18	70
3	jaune	480	22	90
4	vert	520	26	110
5	bleu	560	30	130
6	-	600	-	-

(1) Conformément à AFNOR 03-156 d'octobre 1965 : Un J/cm^2 = env. 0,1 kilogrammètre/cm^2.

(2) Pour les nuances suivant la nature de l'enrobage, voir tableau 3 page 40.

En ce qui concerne la forgeabilité, on peut dire que le métal déposé pour lequel le produit $R \times A$ est supérieur à 11 000 est généralement forgeable.

Les électrodes dites "non forgeables" ne conviennent que pour les assemblages courants ou pour les rechargements qui ne doivent pas être "antiusure" (voir § 12.1).

Les électrodes "forgeables", presque toutes à enrobage semi-épais à très épais, sont utilisées pour les travaux de qualité.

Nous tenons à attirer l'attention des ouvriers soudeurs à l'arc sur une *erreur* qu'ils commettent fréquemment, lorsqu'ils ont le choix entre deux ou plusieurs types d'électrodes, en adoptant presque automatiquement *celle dont la résistance est la plus élevée* .

Le cas des rechargements durs étant mis à part, l'électrode doit être choisie de manière telle que le métal déposé possède des propriétés *aussi rapprochées que possible de celles du métal de base*, de façon à tendre vers l'homogénéité du joint.

Pour le soudage des aciers doux, - de loin le plus fréquent, - dont la résistance à la traction est de 370 à 440 N/mm^2, il est conseillé de ne pas dépasser pour le métal déposé une résistance de 480 N/mm^2, surtout pour le soudage des joints bridés, c'est-à-dire dont la dilatation ou la contraction ne sont pas libres. Au-delà de cette résistance, en effet, les risques de trempe du métal déposé s'accentuent, et les craintes de fissures s'aggravent par suite des tensions secondaires qui prennent naissance lors de la sollicitation.

Nous avons rencontré à plusieurs reprises des cas où, par suite d'un bridage inévitable, l'emploi d'électrodes donnant 380-420 N/mm^2 aboutissait à de très bons résultats alors que celui d'électrodes 500-520 N/mm^2 avait dû être abandonné à la suite de fissures de retrait dans le métal déposé.

b) Les caractéristiques d'utilisation

La nuance de l'électrode est imposée, comme nous venons de le voir, par la nature de l'acier qu'elle doit servir à souder. Mais une fois cette nuance fixée, l'utilisateur se trouve encore en présence d'une grande variété d'électrodes qui se distinguent par de nombreux facteurs :

- *La nature du courant* utilisable : alternatif, continu et dans ce dernier cas la polarité recommandée pour l'électrode : négative (normale) ou positive (inversée).
- Les *positions* dans lesquelles il est possible de souder (§ 4.2). Pratiquement, toutes les électrodes permettent de souder à plat, mais il n'est possible qu'avec certaines de souder horizontalement sur paroi verticale, verticalement ou au plafond.
- Les *intensités* maximale et minimale qui, pour un diamètre déterminé d'électrode, peuvent être utilisées :minimale, c'est-à-dire

en-dessous de laquelle l'arc ne serait plus stable, maximale, c'est-à-dire au-dessus de laquelle l'électrode rougirait et deviendrait inutilisable.

- La *facilité d'amorçage* et la *stabilité de l'arc*,qualités qui vont généralement de pair. Pour certaines électrodes et surtout pour certains diamètres d'entre elles, comme nous l'avons déjà vu, ces qualités ne peuvent être obtenues que pour une tension d'amorçage supérieure à la normale (voir § 1.6).
- La *facilité d'enlèvement du laitier*, dont la densité, la fusibilité et l'adhérence doivent être telles qu'il ne puisse subsister d'inclusions compromettant la résistance et l'étanchéité.
- La *pénétration* (§ 1.5) : elle doit intéresser une profondeur suffisante du métal de base, mais ne doit pas "manger les bords du joint" c'est-à-dire provoquer la formation de morsures ou de caniveaux (*fig.9.1, C, D, F, G*, page 105).
- La *forme* du cordon, laquelle est particulièrement caractéristique pour les cordons d'angle intérieur.Cette forme peut être bombée ou convexe, plate, concave.
- L'*aspect* de la surface du cordon, qui peut être rugueux, lisse ou très lisse.
- La production plus ou moins importante, lors du soudage, de *fumées* dont certaines peuvent être nocives pour le soudeur.
- Le degré auquel le métal déposé est exempt de *porosités*, ou d'inclusions, et par conséquent sa qualité vis-à-vis de l'essai aux rayons X (§ 9.7).

c) Les caractéristiques économiques

Celles-ci interviennent dans une grande mesure dans le choix de l'électrode. Ce sont essentiellement :

- Bien entendu, le *prix d'achat* de l'électrode.
- Le *coefficient de fusion*, qui peut s'exprimer en grammes de métal fondu par ampère et par minute. Pour beaucoup d'électrodes, ce coefficient de fusion est indépendant du diamètre.
- Le *rendement* de l'électrode, c'est-à-dire le poids de métal déposé en % du poids de baguette (âme) utilisé. On remarquera que pour certaines électrodes à enrobage riche en fer métallique (§ 3.2 et page 48) , ce rendement peut être supérieur à 100 % .

La différence entre le poids de métal utilisé et celui de métal déposé constitue la *perte à la fusion*. Cette perte représente la somme :

Du poids du bout d'électrode non utilisable (identique pour toutes les électrodes d'un même diamètre) ;

Du poids de métal volatilisé par suite de la haute température de l'arc ;

Du poids de métal projeté sous forme d'éclaboussures au voisinage du cordon ;

Du poids de métal s'incorporant au laitier.

Le rendement global de la plupart des électrodes est en moyenne de 75%. Il peut être de 70 à 65% pour les électrodes des classes 0 et A (voir page 45).

- La *facilité d'enlèvement du laitier*, facteur que nous avons déjà rencontré parmi les caractéristiques d'utilisation, mais qui intervient aussi comme caractéristique économique. C'est cette facilité qui conditionne en effet les temps morts nécessités par l'opération de piquage et de brossage du laitier, et par conséquent le facteur de marche du poste de soudage.
- La *conservation* des électrodes. L'hygroscopicité * des enrobages provoque leur détérioration par l'humidité. Il faut alors, soit les rebuter, soit les sécher, et dans les deux cas le prix de revient se trouve augmenté.

d) Les différentes propriétés des enrobages

Avant de passer à la classification proprement dite, il est nécessaire de bien définir les propriétés essentielles des enrobages, propriétés qui constituent, en fait, la "clef" de cette classification.

On peut distinguer :

- Suivant la *composition chimique globale* :

Enrobages *organiques* (non utilisés) : ceux qui sont constitués entièrement de matières à base de carbone et par conséquent combustibles, telles que la cellulose, le papier, le coton, l'amidon, etc...

Enrobages *minéraux*: ceux qui sont constitués pour une très grande part par des produits à base autre que le carbone et par conséquent non combustibles : minerais, oxydes, métaux et sels métalliques. La plupart de ces enrobages contiennent d'ailleurs aussi de petites quantités de produits organiques.

Enrobages *semi-organiques* : ceux qui contiennent, à côté de produits minéraux, une notable proportion de produits organiques.

- Suivant l'*affinité* * *chimique* :

Enrobages *acides* : ceux dans la partie minérale desquels dominent les composés à réaction acide, c'est-à-dire qui, à haute température, attaquent fortement les métaux et leurs oxydes. On dit aussi : enrobages *scorifiants*. Le plus fortement acide de ces composés est la *silice* ou quartz (anhydride silicique SiO_2) qui forme avec les métaux ou leurs oxydes des silicates plus ou moins fusibles (1). Puis vient le *rutile* (anhydride titanique ou oxyde de titane TiO_2) qui figure dans beaucoup d'enrobages à cause de son pouvoir désoxydant et dénitrurant (§ 3.2) et de son pouvoir ionisant et par conséquent stabilisateur de l'arc.

---

(1) Ainsi, la silice, dont le point de fusion est 1 713°C , peut former avec l'oxyde de fer FeO, dont le point de fusion est 1 370°C, des silicates qui fondent à 1 230°C.

Enrobages *basiques* : ceux dans la partie minérale desquels dominent les composés à réaction basique, c'est-à-dire qui sont eux-mêmes des métaux, des oxydes ou des carbonates métalliques et qui neutralisent les composés acides. Ce sont surtout le *carbonate de calcium* CO_3Ca, le *fluorure de calcium* CaF_2 et le *carbonate de magnésium* CO_3Mg, puis *l'oxyde de manganèse* (MnO) et l'*oxyde de fer* (FeO). L'*alumine* ou oxyde d'aluminium Al_2O_3) agit le plus souvent comme base, mais dans certaines conditions peut fonctionner comme acide.

Enrobages *saturés* (1) : ceux dans la partie minérale desquels les composés acides et les composés basiques se saturent mutuellement c'est-à-dire s'équilibrent.

- Suivant le *pouvoir oxydant* :

Enrobages *oxydants* : ceux qui produisent lors de la fusion une oxydation des éléments du bain de métal déposé.

Enrobages *réducteurs* : ceux qui contiennent des composés capables de réduire, c'est-à-dire de désoxyder les oxydes existant dans le bain de fusion et souvent, d'empêcher l'oxydation de celui-ci par l'air ambiant.

Enrobages *neutres* : ceux qui contiennent des composés qui ne sont ni oxydants ni réducteurs, ou bien qui contiennent des composés oxydants et des composés réducteurs qui se compensent mutuellement.

- Suivant le *comportement* au cours du soudage :

Electrodes à enrobage *fusible* : celles dont l'enrobage possède un point de fusion relativement bas (1 300 à 1 400°C) et inférieur à celui de l'acier (1 450 à 1 500°C).

Electrodes à enrobage *réfractaire* : celles dont l'enrobage possède un point de fusion relativement élevé (1 500 à 1 550°C) et supérieur à celui de l'acier.

Electrodes à enrobage *semi-volatil* : celles dont une proportion importante de l'enrobage est constituée par des produits qui brûlent ou se volatilisent au cours du soudage (2) .

Electrodes à *apport de métal par l'enrobage* : celles qui, tout en pouvant avoir l'un des trois caractères précédents, présentent un autre caractère qui prédomine : la forte proportion de fer métalli-

---

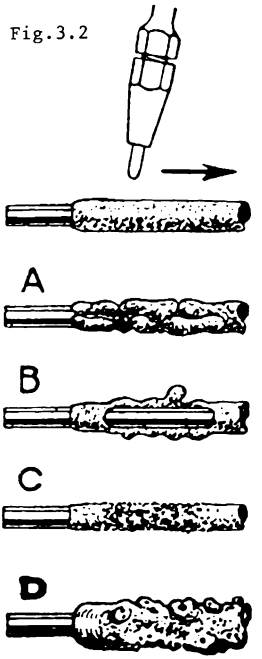
(1) On dit parfois "neutres". Afin d'éviter toute confusion nous préférons réserver ce dernier qualificatif aux enrobages qui ne sont ni réducteurs ni oxydants.

(2) Certains spécialistes distinguent les enrobages "volatils" et les enrobages "semi-volatils", les premiers contenant plus de matières volatiles que les seconds. Comme la proportion de matières volatiles ne dépasse jamais 35 à 40%, nous trouvons illogique l'appellation "enrobages volatils" et conservons pour ceux à teneur relativement élevée en matières volatiles la désignation "enrobages semi-volatils".

que que contient leur enrobage et qui contribue à l'apport de métal dans le bain de fusion.

Procédé d'atelier pour reconnaître rapidement le comportement de l'enrobage : Une électrode de 3,25 ou 4 mm est posée à plat sur une table en fer ou en fonte.

Fig.3.2



Avec un chalumeau oxyacétylénique de 150 à 250 litres/heure, normalement réglé, on passe rapidement le long de l'électrode (*fig.3.2*) en faisant attention de ne pas toucher la baguette avec le dard (cône lumineux) de la flamme. L'opérateur doit porter des lunettes de soudeur au chalumeau afin de bien se rendre compte de l'effet de la flamme sur l'enrobage :

A. L'enrobage se boursoufle et ne fond pas franchement avant que la baguette soit au rouge clair ; même alors, l'enrobage ne se détache pas nettement de l'âme : enrobage *réfractaire*.

B. L'enrobage fond rapidement et laisse la baguette découverte avant qu'elle soit au rouge : enrobage *fusible*.

C. L'enrobage fond très peu mais se carbonise (odeur de brûlé) ; il s'y forme des points incandescents ; il subsiste après l'essai une surface noirâtre et grenue : enrobage *semi-volatil*.

D. L'enrobage projette des étincelles et fond en se transformant en une masse poreuse mais résistante, d'un gris foncé bleuté, qui n'est autre que du fer fondu et oxydé : électrode à *apport de métal par l'enrobage*.

e) Classification des enrobages et propriétés caractéristiques de chaque classe

Plus d'une centaine de produits sont actuellement utilisés dans la préparation des enrobages, et un enrobage peut comporter à lui seul plus d'une dizaine de produits.

On conçoit que dans ces conditions, il soit possible de fabriquer une infinité d'enrobages différents. Cependant, on constate que la plupart des électrodes du commerce peuvent se ramener à un petit nombre de types, dont les caractères, d'une marque à l'autre, sont assez voisins.

La classification la plus logique est basée sur la nature des produits qui caractérisent l'enrobage. C'est celle qui a été notamment adoptée dans la Norme française NF A 81-309 de décembre 1962,

dont les symboles sont repris dans les Tableaux 4 et 5 ci-après (la classe Rutile-chaux n'est cependant pas prévue dans cette norme).

Les *nuances* des couleurs conventionnelles reproduites sur le bout dénudé de l'électrode dérivent de la couleur fondamentale correspondant aux propriétés mécaniques (v. Tableau 2, p. 34). Ces nuances sont reprises sur le Tableau 3 ci-après.

TABLEAU 3

Symbole des caractéristiques mécaniques	Couleur fondamentale	Classe	Nuance
2	rouge	R A C	rouge brun rouge vif rose
3	jaune	B R A C	brun orange jaune vif jaune paille
4	vert	B R	vert foncé vert clair
5	bleu	-	-

TABLEAU 4 - *Classification des enrobages*

Classe (1)	Type	*a)*Composition chim.globale	*b)*Affinité	*c)*Pouvoir	*d)*Comportement
O	Minerai de fer, sans ferro-alliages	Minérale	Faiblement basique	Oxydant	Fusible
A	Minerai de fer, avec ferro-alliages	Minérale	Acide	Neutre	Fusible
R	Rutile	Minérale	Fortement acide	Réducteur	Fusible
-	Rutile-chaux	Minérale	Acide	Réducteur	Fusible
C	Cellulose	Semi-organ.	Acide	Réducteur	Semi-volatil
B	Chaux(basique)	Minérale	Fortement basique	Réducteur	Réfractaire
V	Poudre de fer	Semi-organ. ou minérale	Variable	Réducteur	El.à apport de métal par l'enrobage(fus.ou s.-vol.)

(1) Suivant la norme NFA 81-309 (décembre 1962).

Le tableau 5 (en deux parties) montre comment se situent les différentes classes du tableau 4 par rapport aux différentes caractéristiques d'utilisation définies page 35.

Les abréviations suivantes sont utilisées :

Colonne a : = courant continu.

\+ électrode au pôle positif.

\- électrode au pôle négatif.

± électrode au pôle positif ou négatif.

~ courant alternatif.

~ > 75 V : alternatif avec tension d'amorçage au moins égale à 75 V.

Colonne b : P = soudage à plat.

H = soudage de cordons d'angle horizontaux.

V = soudage vertical

V_m = soudage vertical en montant.

V_d = soudage vertical en descendant.

O = soudage au plafond.

Lettres soulignées : l'électrode convient particulièrement bien.

Lettres entre parenthèses : l'électrode ne convient pas toujours.

TABLEAU 5

Caractéristiques d'utilisation des différentes classes d'enrobages

Classe	Type	a) Nature du courant	b) Positions	c) Intensités pour diamètre						d) Arc
					2,5	3,25	4	5	6,3	
O	Minerai de fer sans ferro-alliages	= ∿ ±	P	Min.	60	100	135	175	240	Très facile
				Max.	90	140	175	220	285	Traînant
A	Minerai de fer avec ferro-alliages	= ± ∿	P(H,V_m)	Min.	-	100	120	180	240	Très facile
				Max.	-	140	180	270	385	Traînant
R	Rutile	= ± ∿	P H,V,O,pour Ø < 5 mm	Min.	40	80	120	150	205	Très facile
				Max.	90	130	180	260	380	Traînant
-	Rutile-chaux	= ± ∿	P,H,V,O	Min.	40	70	120	150	190	Très facile
				Max.	90	120	170	250	290	Traînant
C	Cellulose	= ± ∿ > 75V	P,H,V,O	Min.	30	80	120	150	205	Assez facile
				Max.	85	120	160	250	285	
B	Chaux (basique)	= + ∿ > 75V	P,H,V,O (1)	Min.	65	100	140	200	250	Moins facile
				Max.	90	140	180	250	310	
V	Poudre de fer semi-volatil	= - ∿> 70V	P,H,V_d,O	Min.	80	140	180	240	290	Très facile
				Max.	120	165	220	290	400	Traînant
	Poudre de fer fusible	= - ∿	P	Min.	-	-	190	250	360	Très facile
				Max.	-	-	270	350	480	Traînant

(1) Il existe maintenant, en Ø 4 et 5 mm, des électrodes à enrobage basique spécialement appropriées au soudage vertical descendant.

TABLEAU 5 (Suite)
Caractéristiques d'utilisation des différentes classes d'électrodes

Cl.	Type	*c)* Laitier	*f)* Pénétr.	*g)*Forme cordon	*h)*Aspect cordon	*i)*Fumées	*j)*Qualité rayons X
O	Minerai de fer sans ferro-alliages	Abondant,lourd se détachant seul	Faible	Concave	Très lisse	Faibles	Médiocre
A	Minerai de fer avec ferro-alliages	Abondant,boursouflé, facile à enlever	Forte	Concave	Très lisse	Moyennes Inoffensives	Excellente
R	Rutile	Moyen,lourd,assez visqueux,facile à enlever	Moyenne	Convexe	Lisse	Assez faibles	Médiocre
-	Rutile-chaux	Fluide,moyennement lourd,facile à enlever	Moyenne	Convexe	Lisse	Assez faibles	Assez bonne
C	Cellulose	Mince,léger,se figeant rapidement	Forte	Plat à Convexe	Rugueux	Abondantes Inoffensives	Excellente
B	Chaux(basique)	Moyen,brun brillant,peu couvrant	Forte	Plat à Convexe	Assez lisse	Moyennes Nocives	Bonne
V	Poudre de fer semi-volatil	Moyen,facile à enlever	Très forte	Plat	Assez lisse	Abondantes	Bonne
	Poudre de fer fusible	Abondant,facile à enlever	Très forte	Plat	Assez lisse	Moyennes	Bonne

Dans la colonne *d* , la mention "Traînant" signifie que l'on peut utiliser la méthode de soudage *automatique-manuelle* décrite plus loin au § 6.2.

Nous allons maintenant décrire plus en détail les différentes classes d'électrodes énumérées aux tableaux 4 et 5 :

Classe O. - *Electrodes à enrobage oxydant (oxydes et silicates de fer sans ferro-alliages).* - Leur enrobage est le plus souvent très épais. Le métal qu'elles déposent est très doux parce qu'il est décarburé et pauvre en manganèse et silicium. Aussi, ses propriétés mécaniques laissent à désirer. Il est assez ductile, mais par contre il n'est *pas forgeable*.

Ces électrodes permettent, en soudage à plat, l'exécution de très beaux cordons concaves et sans morsures, convenant spécialement bien pour les soudures d'angle intérieur et les soudures par recouvrement, à condition que la pénétration ne soit pas recherchée. Les électrodes de cette classe conviennent très peu pour les soudures bout à bout, surtout si celles-ci doivent être exécutées en plusieurs passes.

Leur laitier très abondant se détache facilement à condition qu'on l'ait laissé refroidir, et souvent éclate de lui-même au cours du refroidissement (attention aux yeux !).

Ces électrodes sont à rejeter pour les assemblages fortement sollicités et ne peuvent servir que pour la construction de petits réservoirs, la ferronnerie, les cadres de fenêtre, les assemblages de brides sur tuyauteries à faible pression, la fabrication d'outillages, etc...

Elles exigent une parfaite préparation du joint.

Enfin, il est à noter qu'elles sont peu sensibles à l'humidité et se conservent de ce fait sans difficulté.

Classe A. - *Electrodes à enrobage à base d'oxydes et de silicates de fer, avec ferro-alliages.* - Ces électrodes constituent un perfectionnement des précédentes.

La présence de ferro-alliages, - ferromanganèse notamment, - fait perdre à l'enrobage ses propriétés oxydantes et améliore notablement les propriétés mécaniques du métal déposé, même pour une épaisseur moindre d'enrobage. Ce métal est de ce fait forgeable et d'excellente qualité vis-à-vis de l'essai aux rayons X .

Les électrodes de la classe A permettent, non seulement le soudage à plat, mais aussi le soudage vertical (en montant seulement!) et horizontal sur plan vertical.

A plat, la soudure peut s'exécuter sous un courant assez élevé et, dans ce cas, avec une grande vitesse de fusion. Le cordon est concave, fortement pénétré et sans morsures. Le bain de fusion et le laitier sont très fluides.

L'arc obtenu avec ces électrodes est particulièrement chaud, de sorte que, si le métal de base est sensible à la fissuration, elles ne sont pas à conseiller. D'un autre côté, pour la même raison, les pertes par éclaboussures sont assez élevées et, de ce fait, le rendement relativement faible.

Comme les électrodes de la classe O , celles de la classe A exigent une préparation parfaite.

Elles sont peu sensibles à l'humidité et se conservent bien. Toutefois, il faut les sécher si les joints soudés doivent être soumis au contrôle radiographique.

Classe R. - *Electrodes à enrobage à base de rutile* (oxyde de titane)- Ces électrodes ont été longtemps les plus employées.

Le rôle du rutile dans leur enrobage est surtout d'augmenter l'ionisation * dans l'arc et d'obtenir en conséquence un arc très stable et d'amorçage facile. Aussi leur manipulation est-elle très aisée.

En général, ces électrodes sont utilisées pour le soudage à plat et le rechargement, pour lequel leur cordon convexe est tout indiqué. On peut aussi souder sur plan vertical et au plafond avec les diamètres allant jusqu'à 4 mm inclusivement.

Le laitier assez visqueux des électrodes de cette classe permet leur emploi sur des bords même imparfaitement préparés.

Le métal qu'elles déposent est forgeable mais présente assez facilement des inclusions. Il ne convient généralement pas pour les assemblages devant être radiographiés.

Classe Rutile-chaux. - *Electrodes à enrobage à base de rutile (oxyde de titane) corrigé par addition de carbonate de calcium.* - L'addition de carbonate de calcium aux enrobages précédents rend leur laitier plu fluide et moins gênant pour le travail sur surfaces verticales. Aussi la catégorie Rutile-chaux permet-elle le soudage vertical, particulièrement en descendant, et au plafond.

Les autres caractères sont voisins de ceux de la classe R .

Toutefois, le risque notablement moindre d'inclusions rend le dépôt mieux à même de répondre aux désiderata de l'examen radiographique.

Classe C. - *Electrodes à enrobage riche en cellulose.* - Nous avons déjà dit que ces enrobages étaient désignés sous le nom de "semi-volatils". On les reconnaît aisément, indépendamment de l'essai au chalumeau décrit *fig. 3.2* :

-Par leur production abondante de fumées (éviter de les utiliser en atmosphère confinée, par exemple à l'intérieur de chaudières, citernes, etc...) ;

-Par l'odeur de bois ou de papier brûlé qu'ils dégagent en se consumant ;

-Par la fumée et parfois la petite flamme qu'ils produisent au moment de la coupure de l'arc ;

-Par l'aspect particulier, pendant le soudage, du bout de l'enrobage qui semble "s'émietter" dans l'arc.

Ce sont des électrodes à forte pénétration, dont le laitier, peu abondant et se figeant rapidement, n'a que peu tendance à s'inscruster dans les creux. Elles conviennent bien en toutes positions et pour les assemblages même imparfaitement préparés. Elles sont également indiquées pour le soudage de pièces en *acier moulé*, qui présentent souvent des poches et des soufflures.

L'action métallurgique du laitier est moindre avec les électrodes à enrobage semi-volatil qu'avec celles des autres catégories. Par contre, la gaine gazeuse due à la volatilisation de la cellulose exerce une certaine action protectrice vis-à-vis de l'action des gaz de l'air.

Le cordon présente de fortes ondulations ; il est d'un aspect nettement moins beau que celui déposé par les autres catégories d'électrodes.

Le métal déposé est de bonne qualité et forgeable. Il répond bien aux désidérata de l'examen radiographique.Par contre,on lui reproche une teneur particulièrement forte en hydrogène dissous (provenant de la cellulose) qui, depuis quelques années, est considéré comme favorable au "vieillissement" de l'acier (réduction progressive de la résistance au choc) ainsi qu'à la production de *fissures* lorsqu'on soude sur de fortes épaisseurs ou sur des ensembles bridés.

Classe B. - *Electrodes à enrobage basique.* - Les inconvénients que nous avons cités en dernier lieu pour les enrobages semi-volatils, considérés comme de première qualité à part cela, avaient conduit les ateliers français de constructions navales, dès avant la guerre, à développer l'emploi des électrodes à enrobage basique (électrodes dites, pour cette raison, "*Marine*"). Actuellement cet emploi s'est étendu également dans d'autres pays et notamment aux Etats-Unis (électrodes "Low-H" c'est-à-dire "à base teneur en hydrogène").

Les enrobages basiques sont à base de carbonate de calcium CO_3Ca (craie, marbre). Mais, comme des teneurs trop élevées en ce produit rendraient le laitier exagérément réfractaire, on est amené à ajouter à l'enrobage du fluorure de calcium CaF_2 (*spath fluor*). C'est le prin-

cipal point faible des enrobages basiques, car les vapeurs dégagées par ce produit sont irritantes et même toxiques. De grandes précautions doivent donc être prises lorsqu'on est amené à utiliser des électrodes à enrobage basique dans des espaces confinés.

Un autre inconvénient de ces électrodes réside dans la facilité moindre du maintien de l'arc, dû à la faible proportion de produits ionisants comme le rutile. La manipulation de ces électrodes exige donc des soudeurs très qualifiés.

D'autre part, leur emploi requiert de préférence le *courant continu* (électrode au pôle *positif*), bien que certaines marques fonctionnent aussi en alternatif si la tension d'amorçage est au moins égale à 75 V.

Deux autres inconvénients sont encore à signaler :

La marge moins étendue des intensités utilisables (voir tableau 5) ;

La forte *hygroscopicité* des enrobages qui nécessite la conservation des électrodes en atmosphère sèche ou, si cela n'a pas été fait, leur séchage à 250-300°C avant utilisation.

Ces divers inconvénients, - qui ne sont pas négligeables, - étant mis à part, les électrodes à enrobage basique présentent de sérieux avantages : l'acier qu'elles déposent est très sain, très voisin du métal de l'âme c'est-à-dire très peu décarburé et très peu appauvri en manganèse, satisfaisant aux essais aux rayons X , d'excellentes propriétés mécaniques même à basse température, très peu sensible à la fissuration et insensible au vieillissement.

L'emploi de ces électrodes apporte donc une grande sécurité aux constructions en acier de qualité et en fortes épaisseurs.

Signalons en outre que ces électrodes, grâce à la haute teneur en calcium de leur enrobage, sont particulièrement indiquées pour le soudage des aciers contenant du soufre et utilisés pour certaines pièces mécaniques destinées à être usinées.

Enfin, pour autant que les électrodes soient parfaitement sèches, l'absence d'hydrogène dans le métal déposé approprie l'emploi de ces électrodes aux assemblages des tôles devant être émaillées à chaud (l'hydrogène se dégageant lors de l'émaillage conduisant à la formation de pustules).

Classe V. - *Electrodes à apport de métal par l'enrobage.*- En fait, dans beaucoup d'électrodes, certains éléments d'addition, contenus en faible proportion dans l'enrobage, s'incorporent plus ou moins au métal déposé et améliorent ses propriétés.

Mais on distingue plus particulièrement sous le nom d'électrodes "à apport de métal par l'enrobage" celles dont l'enrobage contient une notable proportion de *fer métallique*. Celui-ci, s'ajoutant à l'acier de l'âme, s'incorpore au métal déposé. On peut arriver ainsi, en fondant par exemple 100 g de fil d'électrode, à déposer plus de 100 g de métal. La notion de "rendement" de l'électrode, telle que nous l'avons définie au § 3.5, perd alors sa signification, bien que ces électrodes soient commercialement désignées sous le nom d'électrodes "à haut rendement".

Les électrodes de cette classe sont intéressantes à beaucoup d'égards.

Leur enrobage est relativement conducteur, ce qui permet de faire passer dans l'électrode un courant nettement plus intense (voir tableau 5) que dans les électrodes des autres classes. Il en résulte une grande vitesse de fusion et par conséquent un avancement rapide. Une électrode de 3,25 mm par exemple, qui pour les autres classes ne pourrait être utilisée pour souder sur une tôle de plus de 12 mm d'épaisseur (voir *fig.6.8*), peut souder sans inconvénient sur une tôle de 20 mm.

L'amorçage de l'arc est très facile avec les électrodes de la classe V . On peut même, si l'on dispose d'un porte-électrode muni d'un bouton-poussoir, poser l'électrode sur le point de départ de la soudure avant d'enclencher, puis mettre le masque ou l'écran et fermer ensuite le circuit.

La pénétration de ces électrodes est *très forte* et, pour les soudures bout à bout, permet dans bien des cas de travailler sur bords non chanfreinés.

Pour les soudures sur tôles épaisses accessibles sur leurs deux faces, la forte pénétration permet d'éviter le burinage ou le gougeage avant la reprise à l'envers. Enfin, pour les soudures d'angle intérieur, le dépôt du cordon assure une pénétration complète et évite le défaut d'angle (*fig.9.2*) .

Ces électrodes sont surtout utilisées par la méthode "automatique-manuelle" (§ 6.2) c'est-à-dire par traînage sur la pièce à souder. C'est ce qui amène certains fabricants à les désigner sous le nom d'électrodes "*contact*". On pourrait croire pour cette raison que l'arc est très court. Il n'en est rien, car il se présente en réalité suivant la *figure 3.3*. C'est le bord de l'enrobage, et non l'extrémité de l'âme, qui est en contact avec le bain de fusion. L'arc est donc *long*, et la tension d'arc est nettement plus élevée que pour les autres classes d'électrodes. Elle atteint 40 à 50 V. Comme les postes de soudage sont normalement étalonnés pour une tension beaucoup plus faible, les indications d'intensité figurant sur les postes *ne sont plus valables* pour l'emploi des électrodes de la classe V . *Il faut*

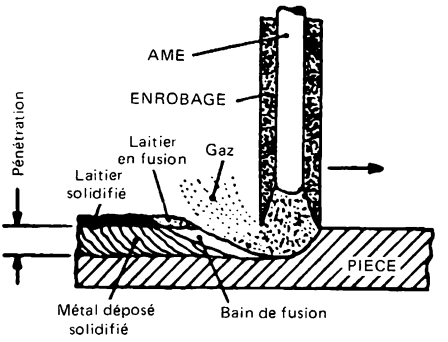


Fig.3.3

donc contrôler l'intensité au moyen d'un ampèremètre ou, lorsqu'on soude en alternatif, au moyen d'une pince ampèremétrique (voir § 3.16).

Le tableau 5 montre qu'il existe deux sous-classes d'électrodes à apport de métal par l'enrobage.

La première, dont l'enrobage est semi-volatil, s'utilise sensiblement comme les électrodes de la classe C .

La seconde, dont l'enrobage est fusible, ne peut s'utiliser qu'à plat, et sa manipulation se rapproche de celle des électrodes de la classe O .

En raison du grand volume de métal de base fondu pendant le soudage avec des électrodes de la classe V , le métal déposé se trouve mélangé avec une proportion relativement importante de métal de base. Ses propriétés dépendent donc, dans une plus forte mesure que pour les autres électrodes, des propriétés du métal de base et, pour cette raison, les qualités de soudabilité de ce métal de base sont d'une importance capitale.

Signalons enfin, bien qu'il ne s'agisse plus ici de soudage manuel, que l'on utilise dans les procédés semi-automatiques et automatiques tels que le soudage sous flux électro-conducteur (voir chap. 14) des électrodes tubulaires continues. Elles sont constituées par un *tube ou fil fourré* de flux dont les compositions se rapprochent de celles des enrobages des électrodes manuelles. Certains de ces tubes sont fabriqués au moyen d'un ou de deux feuillards enroulés sur eux-mêmes de telle manière qu'une sorte de tube intérieur soit constitué, lequel est fourré de flux à base de poudre de fer, l'espace entre les deux tubes étant fourré d'un autre flux (*fig.12.1*). On arrive ainsi à combiner, au cours d'une même opération, les avantages des différents types d'enrobages.

3.6. Outillage accessoire du soudeur à l'arc

Cet outillage comprend :

a) La pince porte-électrode : Cette pince est en cuivre ou en laiton afin de bien conduire le courant et de s'échauffer le moins possible. Elle comporte un manche entouré d'une gaine en matière isolante. Divers types de pinces existent sur le marché. Les unes (*fig.3.4*) sont à serrage de l'électrode par poignée formant levier, les autres à

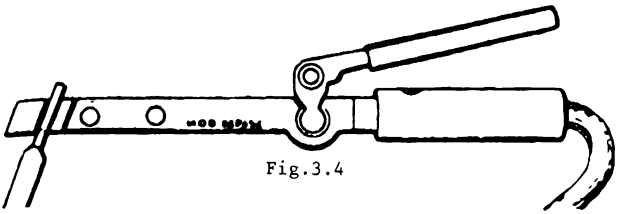


Fig.3.4

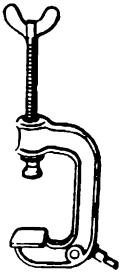


Fig.3.6

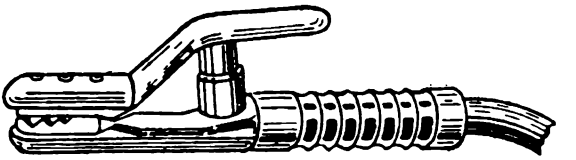


Fig.3.5

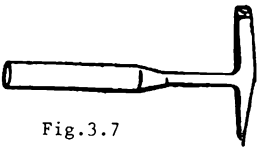


Fig.3.7

Fig.3.8

serrage automatique par ressort (*fig.3.5*). Certaines sont munies d'un bouton-poussoir permettant de couper ou de fermer le circuit. La pince doit être parfaitement assujettie sur son câble et avoir ses mâchoires fréquemment piquées de façon que les surfaces de contact avec l'électrode restent propres et maintiennent un bon contact. Il ne faut pas perdre de vue que pour l'utilisation d'intensités supérieures à 300 A, une pince plus massive et par suite plus lourde que la pince normale est absolument nécessaire.

b) La pince de masse : Elle peut être constituée par un simple serre-joint (*fig.3.6*). Elle doit être également maintenue en état de propreté et solidement assujettie sur le câble de masse (voir § 2.3).

c) Un marteau-piquette : Celui-ci sert au piquage du laitier et possède d'un côté un tranchant, de l'autre une *pointe* (*fig.3.7*) .Pointe et tranchant seront toujours maintenus bien vifs de façon à être efficaces.

d) Un marteau ordinaire et un burin : pour compléter ce piquage aux endroits où le laitier adhère fortement, ainsi que pour nettoyer l'envers des soudures faites sur chanfrein.

e) Une ou deux brosses métalliques (*fig.3.8*) bien dures ; une brosse étroite de 25 à 30 mm de largeur est très utile pour le nettoyage des cordons exécutés dans les angles rentrants ou les endroits peu accessibles.

3.7. MATÉRIEL DE PROTECTION DU SOUDEUR

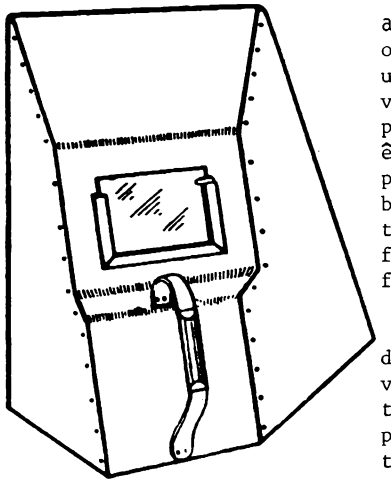


Fig.3.9

a) Un écran à main (*fig.3.9*), en triplex ou en fibre, à larges flancs, équipé d'un verre blanc, côté travail, et d'un verre de protection de couleur appropriée, côté visage. Le verre blanc doit être remplacé dès qu'il est suffisamment piqué pour compromettre la visibilité du bain de fusion. Il existe plusieurs teintes de verres de couleur, d'autant plus foncées que l'on travaille avec de plus fortes intensités de courant.

Il est indispensable pour le soudeur soucieux de la conservation de sa vue, de n'utiliser que des verres protecteurs de marque, de nuance bien appropriée aux travaux qu'il a à effectuer.

Le soudeur doit prendre soin de son écran et de ses verres. Le verre de couleur ne peut être utilisé s'il est fendu, ni l'écran s'il présente des fissures ou des trous par lesquels filtreraient les rayons nocifs émis par l'arc (ultraviolets * et infrarouges *).

Le soudeur doit veiller à ne jamais amorcer un arc lorsqu'il n'a pas les yeux protégés par l'écran. Les ouvriers travaillant dans le voisinage du soudeur seront protégés également par des paravents en toile noire opaque ou en tôle. Les rayons reçus tangentiellement étant *au moins* aussi dangereux que les rayons perpendiculaires , les aides-soudeurs qui tiennent les pièces à assembler veilleront tout spécialement à leur protection.

De plus en plus, l'usage du *casque relevable* (exemple *fig.3.10*) se substitue à celui de l'écran à main. Il est d'ailleurs indispensable pour le soudage au plafond et pour certains travaux où le soudeur doit avoir une main libre, par exemple pour les travaux sur charpente montée.

b) Un écran de piquage (*fig.3.11*), plat, portant un simple verre blanc. Cet écran sera obligatoirement utilisé pour le piquage du laitier, les éclats de celui-ci étant dangereux pour l'oeil.

Certains écrans à main, munis d'un dispositif permettant d'éclipser le verre de couleur, dispensent naturellement de l'emploi d'un écran de piquage séparé.

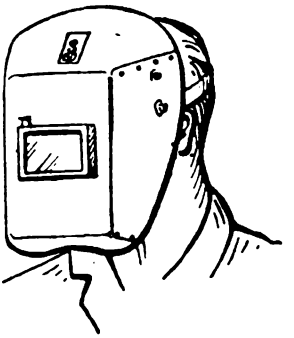
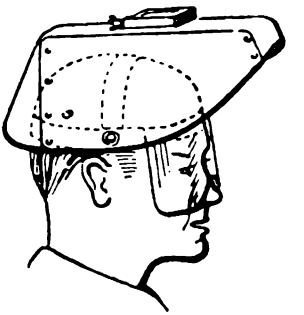


Fig.3.10



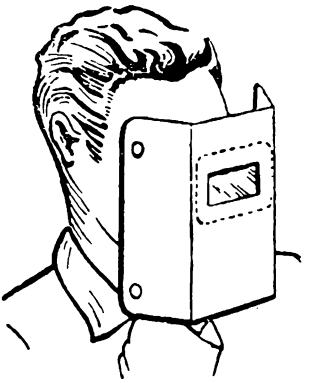


Fig.3.11

c) Une paire de gants de cuir, à crispins (*fig.3.12*).

d) Un tablier de cuir (*fig.3.13*)et des manchettes en cuir (*fig.3.14*).

Fig.3.12

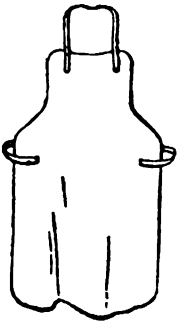


Fig.3.13

Fig.3.14

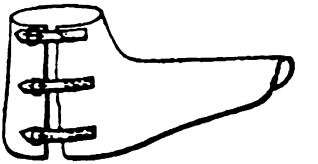


Fig.3.15

Il est recommandé aux soudeurs de ne pas porter de souliers bas, ou, s'ils en portent, de protéger leur cou-de-pied par une *guêtre de cuir* (*fig.3.15*) fixée à la cheville. Les chutes de métal ou de laitier incandescent entre le pied et la chaussure peuvent occasionner de sérieuses brûlures.

3.8. Matériel de contrôle

Nous mentionnons en particulier comme étant très utiles aux agents de maîtrise :

a) Les pinces ampèremétriques (*fig.3.16*) permettant la mesure instantanée d'un courant de soudage *alternatif*. Ces appareils, basés sur le principe de l'induction * , comportent un anneau pouvant s'ouvrir comme la tête d'une tenaille et qu'il suffit de placer autour du câ-

ble porte-électrode pour que l'intensité du courant de soudage s'indique sur l'ampèremètre de l'appareil. On peut ainsi contrôler le travail du soudeur sans interrompre celui-ci.

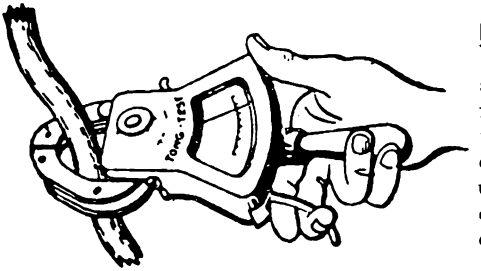


Fig.3.16

b) Les crayons thermo-indicateurs (Thermocolor, Thermocrom, Tempilstiks, etc..) permettant la mesure approximative de la température atteinte, à un moment donné et en un endroit déterminé, par une pièce faisant partie d'un ensemble dont le soudage est en cours.

CHAPITRE 4

MESURES DE SÉCURITÉ ET D'HYGIÈNE

4.1. DANGERS ÉLECTRIQUES

a) Maintenir l'équipement de soudage parfaitement propre et sec.

b) Vérifier que les connexions et raccords sont bien serrés, propres et secs.

c) S'assurer que les câbles ne sont ni de trop faible diamètre (échauffement) ni exagérément longs (chutes de tension).

d) Veiller à ce que le porte-électrode soit d'un modèle approprié au courant maximal à utiliser.

e) S'assurer que l'isolation des conducteurs est en parfait état.

f) Avant tout nettoyage ou toute manipulation intérieure du poste, couper le courant qui l'alimente.

g) Si le poste fonctionne en courant continu, ne jamais changer la polarité avant d'avoir coupé le courant d'alimentation.

4.2. DANGERS D'INCENDIE OU D'EXPLOSION

h) Ecarter du poste toute matière inflammable (paquets de chiffons gras, récipients de graisse, d'huile, etc..) ou bien protéger celle-ci.

i) Jeter les bouts d'électrodes chauds dans un bac métallique prévu à cet effet.

j) Ne jamais souder ni couper sur un récipient pouvant avoir contenu des liquides inflammables (essence, etc..) à moins de l'avoir rincé entièrement à l'eau au moins à trois reprises.

4.3. PROTECTION DU SOUDEUR

k) Verres, vêtements et écrans de protection : voir § 3.7.

l) Assurer une ventilation convenable de l'endroit où l'on soude. L'emploi d'aspirateurs des fumées d'électrodes est toujours recommandé et dans beaucoup de cas indispensable, notamment pour les travaux sur pièces galvanisées, cadmiées, plombées ainsi que pour le soudage au moyen d'électrodes basiques.

m) En cas de soudage dans des espaces confinés tels que l'intérieur de réservoirs, assurer une large ventilation par soufflage d'air, JAMAIS D'OXYGENE.

4.4. Emploi de divers gaz

Les consignes relatives aux mesures de sécurité à observer lors de l'emploi de divers gaz (soudage sous protection gazeuse, IVè partie) sont détaillées au chapitre 4 de notre "Manuel Pratique de Soudage aux gaz et de coupage thermique", éd. Dunod.

DEUXIÈME PARTIE

TECHNIQUE DU SOUDAGE DES ACIERS ORDINAIRES (1)

(1) Nous comprenons sous cette appellation le fer proprement dit et les aciers non alliés, extra-doux et doux qui constituent plus de 90% des matériaux rencontrés par le soudeur à l'arc. Voir pour plus de détails le § 11.1.

CHAPITRE 5

CONCEPTION ET PRÉPARATION DES JOINTS

5.1. FORME DU JOINT SOUDÉ

Les différentes formes de joints soudés se ramènent toujours aux quelques types suivants (*fig.5.1*) :

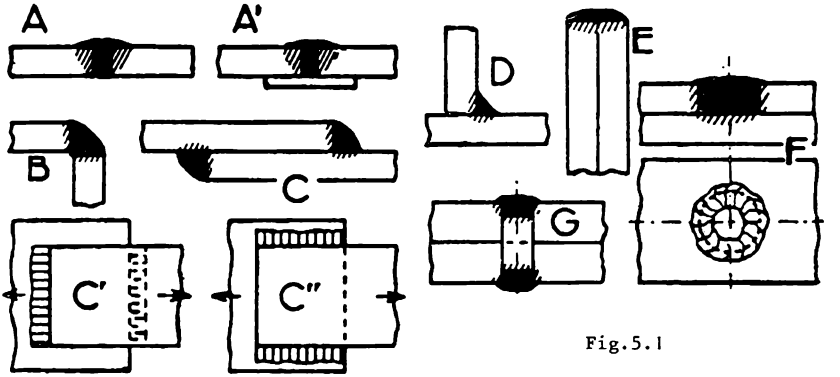


Fig.5.1

a) Soudures dites "*tranche sur tranche*" ;

- Soudure bout à bout non soutenue (A) ou soutenue (A') ;
- Soudure en angle extérieur (B) ;
- Soudure sur tranches (E) .

b) Soudures dites "*tranche sur face*" ;

- Soudure par recouvrement ou à clin (C) ; le cordon est dit *frontal* lorsque son axe est perpendiculaire à la direction de l'effort (C') et *latéral* lorsqu'il lui est parallèle (C") ;
- Soudure en bouchon ou "faux rivet" (F), à laquelle on peut rattacher la "goupille soudée" (G).

c) Soudures dites "*face sur face*" ;

- Soudure en angle intérieur ou *en congé* (D), souvent désignée simplement par soudure d'angle.

Sur la *figure 5.1* , les surfaces noires représentent schématiquement le métal rapporté et les surfaces hachurées le métal de base fondu (pénétration).

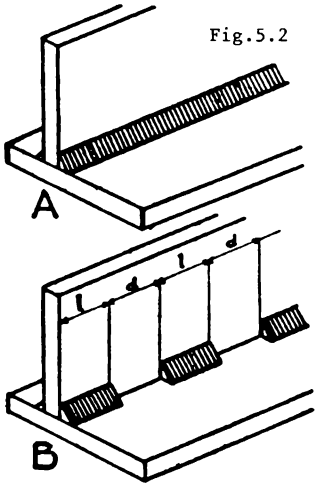


Fig.5.2

On constate que les différentes formes de joints soudés peuvent se classer en deux grandes catégories bien distinctes :
- Les joints *soutenus*, où l'arc, au départ, attaque un support plus ou moins massif : *fig.5.1* A'et surtout C,D,E,F,G. Ces joints sont particulièrement bien du domaine du soudage à l'arc, surtout ceux sur moyenne et sur forte épaisseur.
- Les joints *non soutenus*, où le premier dépôt s'effectue sous la forme d'une sorte de "pont" entre deux bords séparés par un certain écartement (*fig.5.1*, A et B). Les joints non soutenus, d'une exécution plus difficile, appartiennent souvent davantage au domaine du soudage au chalumeau, surtout ceux sur pièces de faible épaisseur.

D'autre part, les cordons de soudure peuvent être *continus* (*fig.5.2*,A) ou *discontinus* (*fig.5.2*,B) . Dans ce dernier cas, le plan d'exécution doit indiquer la longueur l des cordons, leur intervalle et leur nombre. (voir §§ 6.21 et 7.6).

5.2. Positions de la soudure

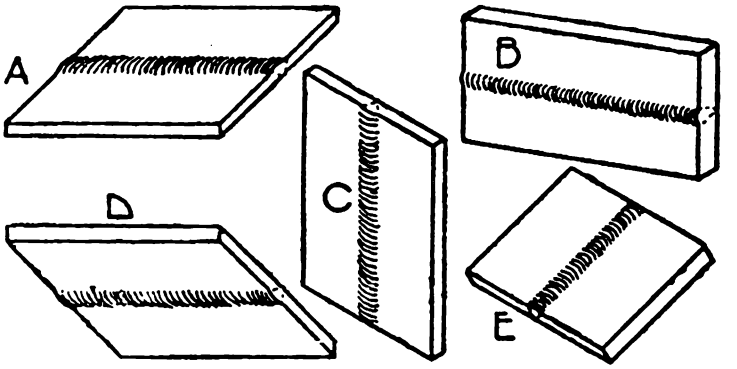


Fig.5.3

Les soudures peuvent être exécutées (*fig.5.3*) :

A plat (A) ;

Horizontalement sur plan vertical, soudure également appelée "horizontale" ou en corniche (B) ;

Verticalement, en montant ou en descendant (C) ;

Enfin, au-dessus du sol :soudure au plafond ou surélevée (D).

Il existe naturellement des positions intermédiaires, telles que demi-montante (E), etc...

L'exécution de la soudure à plat étant toujours la plus facile et la plus économique, le soudeur devra, chaque fois que la pièce peut être déplacée, la mettre dans la position lui permettant de travailler de cette manière. L'emploi de montages tournants ou orientables facilitant ce déplacement (*positionneurs*, *vireurs*) se développe de plus en plus avec raison, en construction soudée. (Exemple : *fig. 5.4*) .

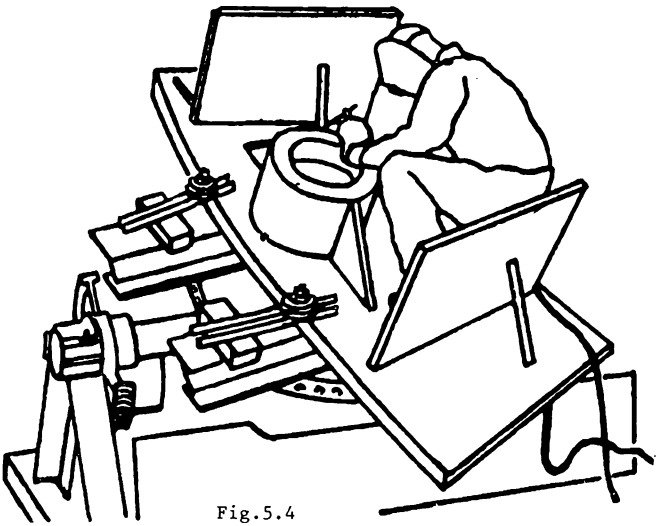


Fig.5.4

5.3. PRÉPARATION DES JOINTS À SOUDER

La préparation des joints à souder présente une très grande importance, surtout en soudage à l'arc. De sa bonne exécution dépend *pour une grande part* la possibilité d'effectuer correctement l'opération de soudage. Même si certaines classes d'électrodes permettent à l'heure actuelle, comme nous l'avons vu, d'exécuter des assemblages acceptables sur des bords imparfaitement préparés, il faut bien retenir que, même avec ces électrodes, l'assemblage est toujours d'exécution plus facile et plus sûre lorsque la préparation est impeccable. Le temps consacré à assurer une préparation parfaite est toujours largement compensé par l'économie réalisée sur le temps d'exécution. Il y a lieu, par conséquent, de se tenir aussi près que possible des conditions de préparation indiquées.

Chanfreinage

Pour les joints bout à bout, à partir d'une certaine épaisseur qui dépend des conditions d'exécution ainsi que nous le verrons plus loin, ainsi que de la classe d'électrode utilisée, il est nécessaire de chanfreiner, c'est-à-dire d'abattre en biseau la tranche des tôles afin que l'arc puisse atteindre et fondre les deux bords sur toute leur épaisseur. Dans certains cas (voir tableau 6) le biseau ne doit pas intéresser toute l'épaisseur ; un méplat ou "carre" peut ou doit subsister à la base du chanfrein.

Pour le soudage sur une face, les chanfreins sont *simples* ou en V (en U pour les fortes épaisseurs) ; pour le soudage sur deux faces, ils sont *doubles* ou en X (ou en double U). On appelle *angle de chanfrein* (mesuré en degrés) l'angle compris entre les deux bords abattus, en position de soudage.

L'angle le mieux approprié à la plupart des cas est celui de 60°, sauf pour les U et double U .

Le chanfreinage s'exécute le plus souvent au chalumeau coupeur. Si cette opération est faite proprement, au moyen de machines oxy-coupeuses automatiques (1) ou tout au moins de chalumeaux guidés, aucun parachèvement de la surface n'est utile ; il suffit de détacher au marteau ou à la brosse les croûtes d'oxydes pouvant adhérer aux coupes. Si la coupe est irrégulière, un parachèvement à la meule est nécessaire. Les chanfreins en U et en double U cités ci-dessous et qui s'utilisent pour les pièces très épaisses ne peuvent être exécutés que par usinage ou par oxy-coupage au moyen d'un appareillage très spécial où l'emploi de chalumeaux "gougeurs" est combiné avec celui de chalumeaux coupeurs proprement dits, ou encore en utilisant le procédé "Arcair" (§15.2).

Si l'on a affaire à la réparation d'une fissure se terminant en pleine tôle, cette fissure doit être, *avant chanfreinage*, arrêtée par un trou d'un diamètre au moins égal à l'épaisseur ; ce trou sera pratiqué à la perceuse ou, à défaut, au chalumeau coupeur.

Dans tous les cas, les surfaces auxquelles s'accrochera le métal déposé doivent être débarrassées par meulage ou grattage à vif de la rouille, la graisse ou la peinture qui les recouvriraient. Des chalumeaux spéciaux dits "décapeurs", peuvent être également utilisés à cet effet. Dans le cas où l'on souderait sur pièces recuites, il faudrait également enlever à la brosse ou gratter la pellicule d'oxyde recouvrant les pièces ("peau de recuit").

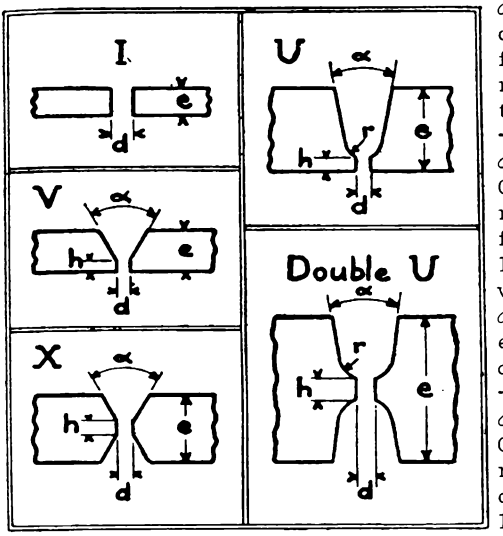
a) Soudures bout à bout

On distingue (tableau 6) :

---

(1) Voir Manuel pratique de soudage aux gaz et de coupage thermique par L. MENDEL, DUNOD, édit.

TABLEAU 6



- Les soudures sur *bords droits* ou *en I*, c'est-à-dire coupés d'équerre avec la surface de la tôle. Cette préparation est définie par l'écartement d des bords.
- Les soudures sur *simple chanfrein* ou *chanfrein en* V. Cette préparation est caractérisée par l'angle α du chanfrein, exprimé en degrés, par la hauteur h de la carre éventuelle et par l'écartement d à la base. Lorsqu'une carre est prévue, la soudure est dite "en Y".
- Les soudures sur *double chanfrein* ou *chanfrein en* X. Cette préparation est caractérisée par l'angle α de chacun des deux chanfreins, par la hauteur h de la carre qui se trouve alors à mi-épaisseur de la tôle, et par l'écartement d à la carre.
- Les soudures sur *chanfrein en* U. Cette préparation est caractérisée par l'angle α compris entre les plans principaux des chanfreins, la hauteur h de la carre et l'écartement d. Le passage entre les plans principaux du chanfrein et la carre est réalisé par un arrondi de rayon r.
- Les soudures sur *chanfrein en double* U. Cette préparation est caractérisée également par l'angle α, la hauteur h, le rayon r et l'écartement d.

Le tableau 7 indique les préparations les plus courantes pour les soudures bout à bout exécutées *à plat*, en fonction de l'épaisseur e et du mode d'exécution choisi ou imposé. L'emploi des électrodes à forte pénétration de la classe V permettant une modification des conditions de préparation, celles-ci sont indiquées entre parenthèses.

Il est à noter qu'à partir de 5 mm d'épaisseur, les soudures sur une face sans reprise à l'envers ne sont généralement pas admises pour les constructions fortement sollicitées.

b) Soudures sur angle extérieur

Les tranches des tôles elles-mêmes, bien mises à vif, servent de surfaces d'accrochage aux cordons. Elles sont écartées d'un espace égal à celui prévu au tableau 7 pour l'assemblage bout à bout des tôles de même épaisseur. Si l'angle formé par les deux tôles est fortement aigu, on procédera éventuellement à un chanfreinage (*fig.5.5* A). S'il est obtus, on chanfreinera ou non suivant l'épaisseur des

TABLEAU 7

Préparation des joints bout à bout non soutenus.
(Les valeurs entre parenthèses se rapportent aux soudures exécutées avec des électrodes de la Classe V).

Epaisseur (mm)	Soudage sur une face sans reprise à l'envers (1)				Soudage sur une face avec reprise à l'envers				Surface sur les deux faces			
	Bords	Angle	*h*	*d*	Bords	Angle	*h*	*d*	Bords	Angle	*h*	*d*
1	I	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
2	I	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
3	I	-	-	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-
4	I	-	-	2	-	-	-	-	I	-	-	1
5	V	60°	1	1,5	-	-	-	-	I	-	-	1,5
6	V	60°	2	1,5	V	60°	3	1,5	I	-	-	2(1,5)
7	V	60°	3	2	V	60°	3	2	I	-	-	2,5(2)
8	V	60°	3	2,5	V	60°	3	2,5	I	-	-	3(2)
9	V	60°	3	3	V	60°	3	3	X(I)	60°	3	3(2)
10	V	60°	3	3	V	60°	3	3	X(I)	60°	3	3(2)
12	V	60°	3	3	V	60°	3	3	X(I)	60°	3	3(2)
15	V	60°	3	3	V	60°	3	3	X(I)	60°	3	3(2)
20	-	-	-	-	V	60°(90°)	3(10)	3(2)	X	60°	3	3
25	-	-	-	-	V	60°(90°)	3(10)	3(2)	X	60°	3	3
30	-	-	-	-	U	24°	3	0	X	60°	3	3
≥ 50					U	24°	3	0	Doub.U	24°	3	0

(1) Pour les joints soutenus, augmenter d de 1 à 2 mm.

tôles et l'angle compris entre leurs tranches, en se basant sur les indications du tableau 7 (*fig.5.5*,B).

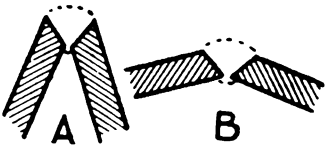


Fig.5.5

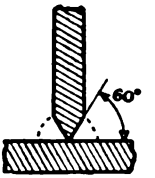


Fig.5.7

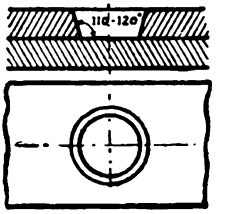


Fig.5.9

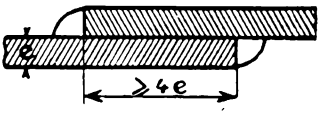


Fig.5.6

Fig.5.8

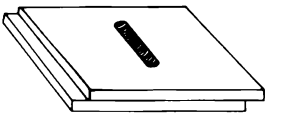


Fig.5.10

c) Soudures par recouvrement

Aucune préparation particulière n'est à prévoir. Il suffit d'assurer une bonne portée du plat couvrant sur le plat couvert (*fig. 5.6*) ; la largeur du recouvrement doit être au moins égale à quatre fois l'épaisseur de la tôle. Pour autant que l'accessibilité le permette, il est nécessaire de prévoir deux cordons.

d) Soudures en angle intérieur (en congé)

Les pièces à souder en congé sont rarement soumises à une préparation spéciale. Pour les tôles à partir de 12 mm d'épaisseur, au cas où le joint devrait subir une grande fatigue, il est parfois prescrit un chanfreinage en V ou bien "en K" (*fig.5.7*) de façon qu'après assemblage il ne subsiste plus aucune surface non liée à l'intérieur du joint. Il ne faut jamais descendre, pour les angles de ces chanfreins, en dessous de 60° , car de tels angles rendraient presque impossible l'exécution d'une soudure correcte. L'emploi d'électrodes de la classe V (§ 5) „ à forte pénétration, permet d'éviter le chanfreinage dans ce cas jusqu'à une épaisseur de 15 à 18 mm.

e) Soudures sur tranches

Jusqu'à 4 mm d'épaisseur inclusivement pour *chaque* tôle, aucun chanfreinage n'est à prévoir, on veillera simplement à une portée parfaite des deux éléments. Au-delà de 4 mm, un chanfrein suivant la *figure 5.8* est recommandable.

f) Soudures en bouchon

Un fraisage des bords du trou à 110-120° (*fig.5.9*) est recom-

mandable pour assurer l'attaque correcte à la base, dès que l'épaisseur de la tôle couvrante dépasse 6 mm ; cet assemblage est d'ailleurs rarement prévu pour les tôles plus minces. Le diamètre varie en général de deux et demi à trois fois l'épaisseur du plat couvrant.

Une variante de la soudure en bouchon est la soudure en entailles (*fig.5.10*) .

CHAPITRE 6
EXÉCUTION DU SOUDAGE

6.1. FIXATION DES BORDS. POINTAGE

Pour que la soudure puisse être exécutée correctement, régulièrement et économiquement, il faut qu'au cours de son avancement les bords se présentent toujours dans la même position l'un par rapport à l'autre, et dans le cas des soudures bout à bout, que leur écartement reste constant.

Sauf pour les joints très courts, où l'échauffement est insuffisant pour provoquer un déplacement des pièces, la fixation de celles-ci avant soudage est nécessaire. Dans la généralité des cas, cette fixation est assurée par *pointage*.

Le pointage consiste à exécuter de très courts cordons de soudure, assez minces, de place en place, de manière à fixer les bords.

Avant même d'y procéder, il y a lieu de présenter les pièces convenablement. Pour ce faire, on peut procéder par boulonnage préalable. Mais surtout pour les assemblages de faibles et moyennes dimensions, l'emploi de clames, et tout spécialement de *clames magnétiques* (*fig.6.1*), constituées par des aimants permanents *, est très pratique et fait gagner du temps.

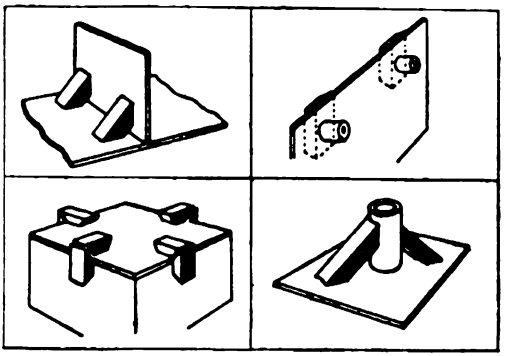


Fig.6.1

Fig.6.2

Pour les soudures bout à bout, il faut, en réglant l'écartement avant le pointage, tenir compte de la contraction des points qui réduira cet écartement.

Pour les tôles chanfreinées en V , lorsque l'envers est accessible, le pointage *à l'envers* est recommandé ; la mise des tôles au même niveau se trouve ainsi facilitée.

Le pointage diffère du soudage proprement dit par le fait que les bords sont froids lorsqu'on les attaque. Il faut donc toujours pointer avec une assez *forte intensité* pour que les points soient bien pénétrés, et s'il s'agit de tôles minces, aussi *plats* que possible. Si les points sont plats, on les refondra en exécutant le cordon d'assemblage. S'ils ne le sont pas, il vaut mieux passer par-dessus, à défaut de quoi, l'on obtiendrait au droit de chaque point une surépaisseur de mauvais aspect (*fig.6.2*).

6.2. Modes d'exécution des cordons de soudure

Les différentes méthodes de manipulation des électrodes peuvent se ramener à trois méthodes-types :

a) Passe tirée, étroite, longitudinale ou en chenilles (*fig.6.3*).

Cette passe s'exécute en tirant l'électrode en ligne droite, sans balancement latéral, à une vitesse et sous une intensité de courant telles que le dépôt soit continu. Le cordon, suivant son étalement, a une largeur égale à une à deux fois le diamètre de l'âme de l'électrode utilisée.

La longueur de cordon que l'on peut déposer de cette manière, par électrode, correspond au minimum aux 8/10 de la longueur de celle-ci ; elle peut atteindre deux fois cette longueur.

Le dépôt d'une passe étroite peut se faire :

Fig.6.3

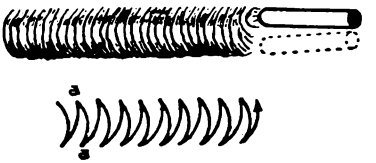


Fig.6.4

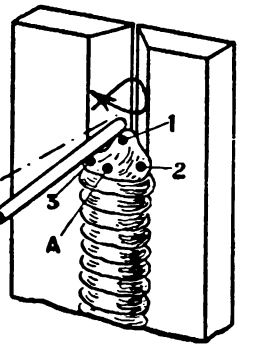


Fig.6.5

- D'un mouvement continu, en tenant un arc de quelques mm de long : c'est la méthode normale ;

- Avec de fréquents et brusques retours en arrière : c'est la méthode utilisée lorsqu'on doit éviter la formation de trous (soudage des tôles minces, première passe des soudures sur chanfreins, surtout si l'écartement est trop grand) ; on procède également de cette manière pour la soudure d'angle avec des électrodes à enrobage mince ;

- D'un mouvement continu, mais en laissant l'électrode en contact avec la pièce et en la *traînant* comme on le ferait avec un crayon pour tracer un trait ; cette méthode, dite "*automatique-manuelle*", est surtout pratique pour les soudures d'angle en une seule passe, où l'angle constitue un chemin de guidage ; elle n'est toutefois utilisable qu'avec certains enrobages (voir tableau 5).

b) Passe balancée, large, transversale ou en lacets (*fig.6.4*).

Elle s'exécute en combinant l'avancement en ligne droite avec un mouvement de balancement transversal. Le cordon a une largeur variant de trois à quatre fois le diamètre de l'âme de l'électrode.

La longueur de cordon que l'on peut déposer de cette manière, par électrode, varie du tiers à la moitié de la longueur de celle-ci.

Le mouvement de balancement sera en général incurvé vers l'arrière de façon à chasser le laitier, et cela d'autant plus fortement que l'enrobage est plus épais et le laitier plus lourd et par conséquent plus difficile à éliminer.

Suivant que l'on passera rapidement ou que l'on insistera au contraire sur les bords de la passe (en *a figure 6.4*), on aura tendance à déposer une chenille bombée ou une chenille plate ; cette dernière est généralement plus indiquée pour les électrodes à enrobage fusible.

Pour une même intensité de courant, la passe large échauffe davantage la pièce, par unité de longueur de soudure, que la passe étroite. Elle permet donc dans une certaine mesure, d'augmenter la pénétration.

c) Passe angulaire ou étagée

Ce mode de dépôt, moins répandu que les précédents, et qui s'applique aux soudures montantes et *sur plan vertical* sur moyennes et fortes épaisseurs, consiste :

- Pour les soudures sur chanfrein ou d'angle (*fig.6.5*), à effectuer des dépôts par tranches successives en suivant avec l'électrode la périphérie du chanfrein ou du congé ; le point 1 (fond du chanfrein) doit être plus haut que les points 2 et 3 de façon à faciliter l'écoulement du laitier vers le bas ; en arrivant au point A, on donne à l'électrode un mouvement saccadé vers soi de façon à chasser le laitier.

Cette méthode est d'une application assez difficile et nécessite beaucoup d'entraînement pour éviter les inclusions de laitier parallèles aux surfaces des tranches. On ne doit donc l'utiliser que dans les cas où le renversement de la pièce à souder est réellement impraticable. L'emploi d'électrodes à enrobage semi-volatil facilite cependant le travail.

- Pour les rechargements, les remplissages de chanfreins ou les passes de finition, à déposer une passe étroite de gauche à droite puis au-dessus de celle-ci une passe étroite de droite à gauche et ainsi de suite (*fig.6.6*). Si l'axe de la soudure est horizontal, les passes successives au lieu d'être perpendiculaires à cet axe sont obliques (*fig.6.7*) ; on avance lentement aux points *a* , rapidement aux points *b* .

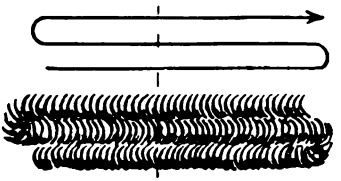


Fig.6.6

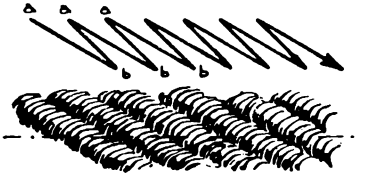


Fig.6.7

6.3. INTENSITÉ DU COURANT DE SOUDAGE EN FONCTION DU DIAMÈTRE DE L'ÉLECTRODE

Le choix de l'intensité du courant de soudage serait très simple si la valeur de l'intensité pouvait être fixée par rapport au diamètre de l'électrode. Il n'en est malheureusement pas ainsi : l'intensité dépend non seulement, comme nous l'avons déjà vu au tableau 5, p. 43 , de la classe de l'électrode, mais encore d'un grand nombre d'autres facteurs que nous examinerons au § 6.5 ; elle peut varier, suivant ces facteurs, du *simple au double* pour un même diamètre d'électrode.

Cependant, il existe, pour chaque électrode enrobée et chaque diamètre, une intensité *minimale* en dessous de laquelle l'arc serait instable, et une intensité *maximale* au-dessus de laquelle l'électrode rougirait et ne pourrait être utilisée entièrement.

Ces valeurs sont indiquées, suivant la classe de l'électrode, au tableau 5.

Toutes autres conditions égales, les électrodes à enrobage épais nécessitent une plus forte intensité que celles à enrobage mince.

Le soudeur pourra retenir la formule simple :

$$I = 50\ (D - 1)$$

(I étant l'intensité en ampères et D le diamètre de l'électrode en millimètres). Cette formule, valable pour toutes les classes d'électrodes sauf la classe V donne une valeur *moyenne*, pouvant servir de *base*. Par exemple, pour $D = 4$ mm, on trouve :

$$I = 50 \times 3 = 150 \text{ A.}$$

En réglant son poste (1) sur l'intensité ainsi déterminée, le soudeur devra ensuite réduire ou augmenter celle-ci *suivant les conditions dans lesquelles il verra s'effectuer le dépôt du cordon.*

6.4. Choix du diamètre de l'électrode en fonction de l'épaisseur de la pièce

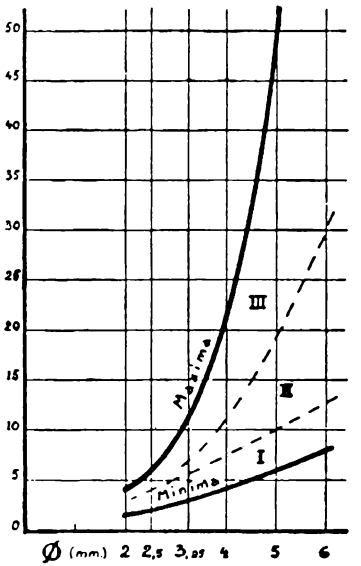


Fig.6.8

C'est une opinion encore assez répandue qu'en soudage électrique à l'arc, la quantité de chaleur à fournir en un temps donné est indépendante de la *masse* de la pièce (tandis qu'elle en dépend au contraire étroitement en soudage au chalumeau).

Cette affirmation n'est valable qu'*entre certaines limites*.

Pratiquement, en effet, il existe une épaisseur en dessous de laquelle il est impossible de souder avec une électrode de diamètre donné car il faudrait, pour éviter les morsures ou les trous, descendre en dessous de l'intensité minimale correspondant à ce diamètre ou bien avancer à une vitesse qui serait impraticable à la main.

Inversement, *il est peu indiqué de souder ou même de recharger des pièces épaisses avec des électrodes de faible diamètre,* car même sous leur intensité maximale ces électrodes ne permettraient pas d'assurer une bonne *pénétration*. La chaleur transmise au métal de base serait trop vite dispersée dans celui-ci ; en outre, le refroidissement trop ra-

(1) Le soudeur doit d'ailleurs toujours se méfier de l'indication donnée par le poste. Elle peut être inexacte pour plusieurs raisons : tension d'alimentation inférieure à la normale, usure du poste, mauvais contacts dans le circuit de soudage (y veiller : voir § 2.3), tension d'arc supérieure à la normale (électrodes classe V). En cas de doute, le contrôle au moyen d'une pince ampèremétrique est recommandable (§ 3.8) dans le cas du soudage en courant alternatif.

pide du bain de fusion et de ses abords provoquerait des phénomènes de trempe ; ceux-ci pourraient facilement, si les pièces sont bridées, conduire à *des fissures, surtout avec certaines classes d'électrodes.*

Le graphique *figure 6.8* indique les limites minimales et maximales des épaisseurs d'acier que l'on peut souder de façon rationnelle avec les diamètres courants d'électrodes :

Le tableau 8 ci-après donne les intensités I , en ampères, et les poids P , en grammes par mètre courant de cordon (passe étroite), en fonction de l'épaisseur *e* et du diamètre d'électrode *d* . (Soudage à plat de l'acier doux ordinaire).

TABLEAU 8

e mm	*d=2*		*d=2,5*		*d=3,25*		*d = 4*		*d = 5*		*d=6,3*	
	I	P	I	P	I	P	I	P	I	P	I	P
1,5	35	*(25)*										
2	45	*(35)*	50	*(40)*								
3	60	*(45)*	70	*(50)*	75	*(70)*						
4	75	*(52)*	85	*(70)*	95	*(95)*	100	*(100)*				
5			95	*(78)*	110	*(110)*	120	*(120)*				
6			100	*(80)*	120	*(120)*	130	*(135)*	135	*(155)*		
8					130	*(132)*	150	*(165)*	160	*(200)*	180	*(255)*
10					135	*(136)*	160	*(185)*	190	*(260)*	245	*(370)*
12					140	*(150)*	165	*(190)*	210	*(290)*	265	*(415)*
15							170	*(200)*	215	*(300)*	280	*(440)*
18							170	*(200)*	215	*(300)*	285	*(450)*
20							175	*(205)*	220	*(315)*	285	*(450)*
22							175	*(205)*	220	*(315)*	290	*(460)*
25									220	*(315)*	290	*(460)*
30									220	*(315)*	290	*(460)*
35									225	*(325)*	295	*(465)*
40									225	*(325)*	295	*(465)*
45									225	*(325)*	295	*(465)*
50									225	*(325)*	300	*(480)*
60											300	*(480)*
70											300	*(480)*
80											305	*(490)*
90											305	*(490)*
100											305	*(490)*

On pourra cependant s'écarter des chiffres de ce tableau :
a) Pour la première passe des soudures sur chanfrein qui pourra, même pour des épaisseurs supérieures à 12 mm, être exécutée avec des électrodes de 3,25 mm si la préparation n'est pas spécialement prévue pour l'emploi d'électrodes de plus grand diamètre.

b) Pour les soudures exécutées sur un plan vertical et simultanément par deux soudeurs travaillant chacun sur une face (§ 6.17. c) ; l'épaisseur maximale sera dans ce cas le double de celle indiquée ci-dessus.
c) Dans le cas où l'on utilise des électrodes de la classe V , à apport de métal par l'enrobage, permettant l'emploi de très fortes intensités.
d) Si la pièce est soumise à un chauffage préalable au chalumeau ou par tout autre moyen : son épaisseur pourra alors être supérieure au maximum indiqué au tableau.

6.5. CHOIX DU DIAMÈTRE DE L'ÉLECTRODE, DU MODE D'EXÉCUTION ET DE L'INTENSITÉ DU COURANT DE SOUDAGE EN FONCTION DE LA FORME ET DE LA POSITION DU DÉPÔT

a) Point de vue économique

Le poids de métal déposé par minute étant, pour une qualité donnée d'électrode (1), sensiblement proportionnel à l'intensité du courant, il y a un intérêt évident à choisir l'électrode aussi grosse et l'intensité aussi forte *que le permettent* d'une part le poste de soudage utilisé (2), d'autre part la classe de l'électrode choisie et enfin les épaisseurs des pièces à souder (§ 6.4), la forme du dépôt à obtenir et sa position dans l'espace.

b) Profil du cordon

Toutes les opérations de soudage à l'arc se ramènent à *accrocher*, par une pénétration suffisante, un cordon de métal d'apport sur une pièce de métal de base ou sur un autre cordon.

La question de la pénétration mise à part (§ 1.5), on peut considérer que le cordon de soudure est constitué par une succession de *gouttes* de métal fondu, comparables au moment de leur dépôt à des gouttes d'un liquide visqueux tel que de l'huile épaisse. Comme de telles gouttes, celles de métal fondu, déposées sur une surface horizontale, s'y étalent d'autant mieux qu'elles sont plus volumineuses.

Par conséquent, un cordon de soudure déposé sous la forme de

(1) Rappelons que ce poids, exprimé en grammes par ampère et par minute, se désigne sous le nom de coefficient de fusion de l'électrode (§ 3.5,c).

(2) A ce sujet, le soudeur doit savoir que les postes ne sont pas établis pour fonctionner d'une façon continue à leur réglage maximal : ils s'échaufferaient trop fortement et se détérioreraient. Un poste fonctionnant à sa puissance maximale doit avoir, en principe, un facteur de marche de 60% maximum (Norme AFNOR A 85-011).

petites gouttes (électrodes de faible diamètre, faible intensité ou bien grande vitesse d'avancement) est toujours plus *bombé* qu'un cordon déposé sous la forme de *grosses gouttes* (électrodes de gros diamètre, forte intensité ou bien faible vitesse d'avancement) (*fig.6.9*).

Cette règle se trouve renforcée par l'intervention du facteur température : les gouttes de faible volume, se solidifiant plus brusquement que les gouttes volumineuses, ont moins le temps de s'étaler.

Fig.6.9

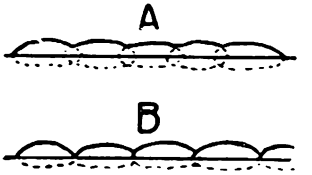


Fig.6.11

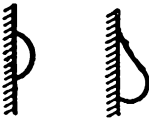


Fig.6.10

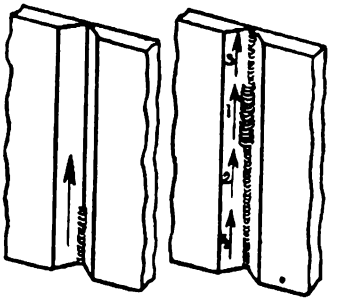


Fig.6.12

c) Dépôt sur une surface non horizontale ou bien au plafond

Sur une surface verticale ou bien *sous* une surface horizontale, c'est-à-dire au plafond, une goutte de métal fondu ne pourra se maintenir, s'accrocher, que si les forces de capillarité qui la retiennent sont supérieures à la force de la pesanteur qui tend à la faire tomber. Une telle goutte se maintiendra si elle est petite (les forces de capillarité l'emportent), elle tombera si elle est volumineuse (la pesanteur prédomine) (*fig.6.10*).

Par conséquent, pour déposer sur une surface verticale ou bien au plafond, on doit procéder par *cordons de faible section* et leur assurer une solidification rapide : opérer par passes étroites, avec des électrodes de faible diamètre et sous intensité plus faible que dans le soudage à plat, ou bien avec une vitesse d'avancement plus élevée.

d) Facilité du piquage

Le laitier est toujours plus facile à détacher des surfaces planes, bombées ou légèrement concaves, que des angles rentrants. On doit donc éviter de former des *sillons*. Par exemple, des cordons déposés parallèlement doivent se présenter suivant la *figure 6.11 A* et non *B* .

e) Choix du genre de passe

Cette question est liée à celle des déformations et tensions dont nous parlerons au § 6.11.

Dès maintenant, nous pouvons cependant poser la règle suivante :

Pour les *soudures longues*, où les déformations (ou les tensions) dans le sens longitudinal sont surtout à craindre, on doit donner la préférence aux *passes étroites*.

Pour les *soudures courtes* et notamment celles d'assemblage bout à bout des barres plates ou des profilés, où les déformations et tensions dans le sens longitudinal sont moins à craindre que celles dans le sens transversal, on donnera la préférence aux *passes larges* ou aux *passes étagées*.

On remarquera que dans le cas d'une soudure verticale bout à bout de barres ou de profilés, il y a contradiction entre la règle c et la règle e en ce qui concerne l'emploi des passes étroites. On procède alors comme suit : passe étroite en montant pour le fond du chanfrein, puis passes larges, montantes, dans un ordre tel que celui indiqué *figure 6.12* de façon à éviter un échauffement localisé trop intense qui gênerait l'accrochage du métal.

f) influence de l'écartement

Dans la pratique, et surtout pour les travaux de tôlerie, serrurerie, chaudronnerie légère, il est fréquent d'avoir entre les pièces un écartement insuffisant ou au contraire excessif. S'il est *insuffisant*, on devra *forcer l'intensité du courant* de soudage et éventuellement adopter une électrode de diamètre supérieur. S'il est *excessif*, on devra au contraire prendre une électrode plus mince et *réduire l'intensité* ; par un mouvement de balancement approprié, le soudeur constituera alors un "pont" de métal déposé entre les bords. L'interposition de bandelettes ou de baguettes entre des bords trop écartés est une pratique à proscrire dans les travaux sérieux ou qui doivent présenter un bel aspect.

g) Attaque des pièces froides

Pour les premières passes sur pièce froide, de même que pour le pointage (voir § 6.1), l'intensité doit toujours être assez élevée. On peut la réduire lorsque la pièce s'est échauffée.

6.6. Position du soudeur

Bien que cette recommandation ne soit pas particulière au métier de soudeur à l'arc, nous insistons bien sur ce point : le soudeur doit toujours se placer dans la position la plus favorable à son travail. Quelques minutes perdues pour disposer la pièce à bonne hauteur, à bien la fixer en vue d'un piquage correct, ou bien inversement à mettre le soudeur à bonne portée de la soudure s'il s'agit de pièces de grandes dimensions, sont largement regagnées par la suite, car le soudeur travaillera alors *plus vite* et *mieux*.

A moins qu'il ne porte un casque, le soudeur doit avoir autant que possible le coude gauche appuyé sur la table ou sur la pièce, son *écran* approché, suivant la puissance de l'arc, à 20 à 40 cm de la soudure ; plus loin, il contrôle mal le bain de fusion ; plus près, le verre protecteur se pique trop vite et se trouve hors d'usage au bout de quelques heures de travail. La fenêtre de l'écran doit être tenue le plus près possible des yeux du soudeur.

Le *câble* porte-électrode ne doit pas fatiguer par son poids ; à cet effet, le soudeur le passera sur son épaule, ou mieux encore le suspendra à une cloison ou à tout autre support à sa portée.

Enfin, de façon à permettre un piquage correct, la pièce à souder devra être convenablement *éclairée*.

6.7. Amorçage de l'arc

Cet amorçage s'effectue le plus souvent par frottement de l'électrode sur la pièce. S'il se fait mal, on vérifie si le bout de l'électrode n'est pas isolé par de l'enrobage et dans ce cas on le gratte.

Lorsque, en soudage au plafond, l'amorçage se fait difficilement, on amorce d'abord un arc à plat ; aussitôt que le bout de l'électrode est porté au rouge, on amorce alors l'arc au plafond.

Notons que l'amorçage d'un arc sur une bouteille de gaz est une pratique absolument à proscrire.

6.8. Longueur de l'arc

L'arc doit être tenu très court. (Voir § 6.2 le cas spécial de la méthode automatique-manuelle).

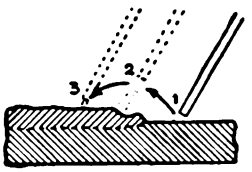


Fig.6.13

Lorsque l'arc est allongé, le métal tombe par grosses gouttes, dont beaucoup éclatent avant de se souder au métal de base et sont par conséquent perdues ; en outre, le métal déposé est alors oxydé et poreux.

On allonge cependant l'arc *intentionnellement*, précisément lorsqu'on veut échauffer localement la pièce en déposant relativement peu de métal, par exemple :

- Afin d'éviter le collage au départ lorsqu'on commence une soudure sur la pièce froide ;
- A la reprise d'un cordon interrompu (*fig.6.13*), pour éviter de former une surépaisseur à la reprise ; la figure indique le moyen de procéder correctement à cette opération.

Il arrive que par suite d'un centrage imparfait de l'enrobage, la fusion de celui-ci se produise "en sifflet" ; il suffit de tourner l'électrode d'un demi-tour dans la pince pour supprimer cet inconvénient.

6.9. Inclinaison de l'électrode

a) Inclinaison transversale

En principe l'électrode doit se déplacer dans un plan perpendiculaire au plan de la soudure (*fig.6.14*), ou, lorsqu'il s'agit d'une soudure d'angle, dans le plan bissecteur de l'angle (*fig.6.15*).

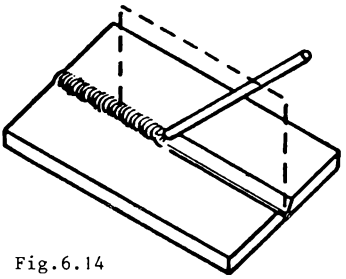


Fig.6.14

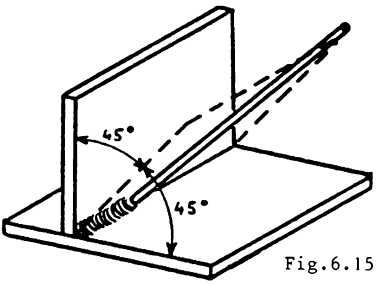


Fig.6.15

Les cas où cette règle est en défaut sont les suivants:

a) Soudage de pièces d'épaisseur différente (à moins que la pièce épaisse ne soit suffisamment préchauffée) ; voir *figure 6.44*.
b) Rechargements en passes étroites ; voir *figure 6.46* .

b) Inclinaison par rapport à la direction d'avancement

L'angle que doit former l'électrode avec la direction d'avancement est le plus souvent de 60 à 70° (*fig.6.16*), mais il peut varier entre 45 et 90° suivant le type de l'électrode et la forme du joint. Il est donc difficile de donner une indication valable pour tous les cas. On peut dire cependant que, sauf en soudure verticale descendante, cet angle doit être maintenu tel que le *laitier ne s'écoule jamais en avant de l'arc* (*fig.6.17*). On distingue généralement bien le laitier du métal en fusion, il apparaît plus clair. Si le soudeur s'est laissé, comme on dit en terme de métier, "gagner par le laitier" (A), il doit interrompre le soudage et piquer avant de repartir, sinon il subsisterait du laitier inclus dans la soudure.

De toutes façons, le cordon doit toujours être "tiré", jamais "poussé", sous peine d'inclusion presque infaillible de laitier. Cette règle peut avoir à guider le soudeur pour le choix du sens d'avancement : par exemple dans le cas d'une soudure AB (*fig.6.18*), il devra aller de A vers B et non de B vers A . La règle peut même intervenir dans le choix du point de départ d'un cordon et de son extrémité : par exemple, un soudeur placé face à une barre ou à un tube cylindrique vertical qu'il doit souder sur un plat horizontal (*fig.6.19*) opérera

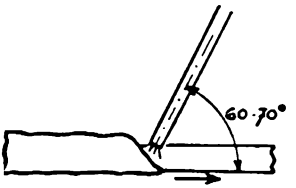


Fig.6.16

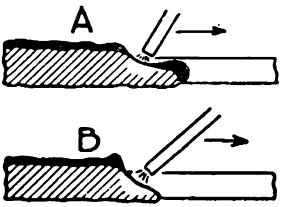


Fig.6.17

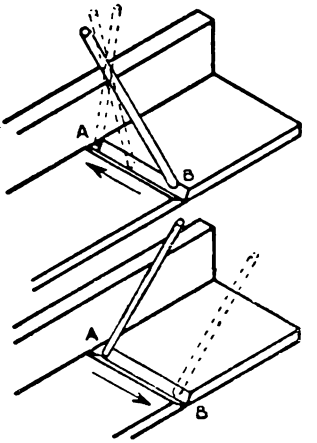


Fig.6.18

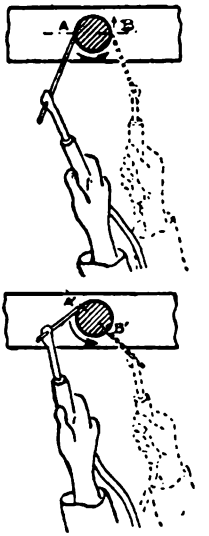


Fig.6.19
(Vue en plan).

d'abord sur une demi-circonférence puis sur l'autre ; il ira de A' à B' et non de A à B , de façon qu'à l'extrémité B de la passe se trouvant à sa droite il ne soit pas forcé de prendre une position incommode ou de se déplacer pour éviter de "pousser" le cordon.

6.10. Piquage du laitier

Qu'il s'agisse d'une soudure en plusieurs passes, d'une reprise à l'envers, de la reprise d'une soudure interrompue, etc.., on ne doit *jamais* déposer du métal sur du laitier. Celui-ci doit donc être enlevé avec soin au moyen du marteau-piquette et de la brosse métallique et, si ce moyen ne suffit pas, à l'aide du marteau et du burin. Il faut attendre pour piquer que le laitier se soit *complètement solidifié* ; d'une part, en effet, il se détache d'autant plus facilement qu'il est plus froid ; d'autre part, comme nous l'avons vu au § 3.2 , l'un des rôles du laitier est de ralentir le refroidissement du métal déposé ; il ne faut donc pas l'enlever prématurément.

Il faut souvent insister sur les bords, où le laitier adhère davantage surtout s'il existe des sillons.

Rappelons aussi que le soudeur doit se protéger les yeux, pendant cette opération, au moyen de l'écran de piquage.

Pour les soudures faites en une seule passe ou pour les passes supérieures des soudures en plusieurs passes, *le piquage est nécessaire*

également, bien qu'il n'y ait plus alors de métal à déposer. Le soudeur y procédera après achèvement de toutes les soudures, d'une part pour vérifier l'absence de défauts d'exécution (voir *figure 9.2*,G page 106), d'autre part pour éviter qu'après peinture éventuelle de la pièce, le laitier, en se détachant, ne découvre une place sans peinture qui s'oxyderait.

6.11. EXÉCUTION DES SOUDURES BOUT À BOUT, À PLAT

Nous renvoyons au tableau 7 page 64 pour ce qui concerne la préparation de ces soudures en fonction de l'épaisseur des tôles.

Deux cas se présentent dans la pratique :

Premier cas : Les pièces ne peuvent pas être retournées

On soude sur une face seulement, soit lorsque l'envers n'est pas accessible du tout, soit lorsqu'on ne peut envisager de reprendre l'envers que par soudage au plafond, ce qu'on peut généralement considérer comme aléatoire.

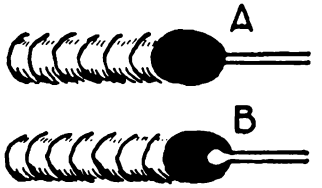


Fig.6.20

En noir : le bain de fusion.

Il faut donc que le *traversé* de toute l'épaisseur soit parfaitement assuré ; pour cela, il est nécessaire que l'écartement des bords soit bien régulier et que l'électrode utilisée pour la passe de fond soit d'un diamètre bien approprié: le plus de facilité est obtenu avec un diamètre supérieur de 1 mm à l'écartement des bords ; on procède éventuellement à un avancement avec brusques retours en arrière afin d'éviter l'effondrement à la racine du chanfrein. On constate le "traversé" d'après l'aspect des bords en avant du bain de fusion : ils doivent présenter (*fig.6.20*, B et non A) un trou avec léger affaissement des bords.

Le tableau 9 ci-après indique, pour les préparations correspondant à la partie gauche du tableau 7, p. 64 , le choix du diamètre des électrodes et le nombre de passes à exécuter en fonction de l'épaisseur. Rappelons à ce propos que le soudage des tôles de 1 à 3 mm s'effectue plus souvent au chalumeau qu'à l'arc car il est plus facile.

TABLEAU 9

Diamètres d'électrodes et nombre de passes pour le soudage bout à bout à plat sur une seule face (soudures non soutenues)			
e (mm)	Ø pour la passe de fond	Passes suivantes	
		Ø	Nombre
1	1,6	-	-
2	2	2	évent.1
3	2,5	2,5	1 à 2
4	3,25	3,25	1
5	3,25	4	1
6	3,25	4	2
7	3,25	4	3
8	3,25	4	3
9	3,25	4	3
10	4	5	2
12	4	5	3

° Suivant l'écartement des bords

Deuxième cas : Les pièces peuvent être retournées

On ne soude que très rarement l'envers des tôles ayant jusqu'à 3 mm d'épaisseur. Le deuxième cas ne sera donc considéré qu'à partir de 4 mm.

On remarquera d'emblée que si les pièces peuvent être retournées, le choix existe entre deux méthodes :
- Le soudage sur une face avec reprise à l'envers, cette reprise consistant dans l'exécution d'un cordon de faible section par rapport à celle du cordon d'endroit.
- Le soudage sur deux faces, le cordon d'envers étant généralement, dans ce cas, de section égale à celle du cordon d'endroit.

Comment choisir entre les deux méthodes ?

De 4 à 8 mm d'épaisseur, et jusqu'à 15 mm si l'on utilise des électrodes à très forte pénétration, le soudage sur deux faces offre les avantages suivants :

a) Les bords ne nécessitent aucun chanfreinage ;

b) Les déformations angulaires (§ 8.1) ou les tensions correspondantes sont réduites, du fait de la symétrie de l'échauffement sur les deux faces ;

c) Jusqu'à 8 mm d'épaisseur on peut souder sur la deuxième face sans avoir préalablement procédé au gougeage de la racine du cordon d'endroit ;

d) La quantité de métal à déposer est moindre à partir de 10 mm (v. tableau 12, p. 94) et déjà à partir de 6 mm si l'on emploie des électrodes de la classe V .

Par contre, l'exécution de soudures sur chanfreins en X ne permet pas toujours d'utiliser, pour les passes de remplissage, des électrodes d'aussi fort diamètre, et de souder aussi rapidement par kilogramme de métal déposé.

Au-delà de 8 mm (de 15 mm pour les électrodes de la classe V) la nécessité de chanfreiner en X conduit aussi, pour les soudures symétriques, à une préparation plus coûteuse. Il en est de même pour les très fortes épaisseurs, l'exécution des chanfreins en double U étant plus difficile que celle des chanfreins en U .

Enfin, l'organisation du travail de soudage peut inciter les agents des cadres à réduire le plus possible la durée du soudage sur pièces retournées ; le soudage sur une face avec reprise à l'envers peut alors être préféré.

Tous ces facteurs doivent être bien pesés. Ce sont eux qui, suivant les circonstances et notamment suivant l'outillage dont on dispose pour la préparation et le positionnement, conduiront à l'adoption de l'une ou l'autre méthode.

Le tableau 10 ci-après donne, pour les préparations correspondant à la partie centrale du tableau 7, p. 64 , le choix du diamètre des électrodes à adopter en fonction de l'épaisseur.

TABLEAU 10

Diamètres d'électrodes à utiliser pour le soudage bout à bout à plat sur une face, avec reprise à l'envers éventuellement après gougeage (G), électrodes normales.				
(mm)	Ø passe de fond	Ø passes suivantes	G	Ø passe d'envers
6	3,25	4	-	3,25
7	3,25	4	X	3,25
8	3,25	5	X	3,25
9	3,25	5	X	4
10	3,25	5	X	4
12	3,25	5	X	4
15	4	5 - 6,3	X	4
20	4	5 - 6,3	X	4
25	4	5 - 6,3	X	5
30	4	5 - 6,3	X	5
40	4	6,3	X	5
50	4	6,3	X	5
60	4	6,3 - 8	X	6,3
80	4	6,3 - 8	X	6,3
100	4	6,3 - 8	X	6,3
Idem, électrodes classe V				
20	5	6,3	-	5
25	5	6,3	-	5

Le tableau 11 ci-après donne les mêmes renseignements pour les préparations correspondant à la partie droite du tableau 7, page 64 .

TABLEAU 11

Diamètres d'électrodes à utiliser pour le soudage bout à bout à plat sur deux faces, avec gougeage éventuel de la racine du premier cordon, électrodes normales.			
e (mm)	Ø passes de fond	Ø passes suivantes	Gougeage
4	3,25	3,25	-
5	3,25	4	-
6	3,25	4	-
7	3,25	4	-
8	3,25	4	-
9	3,25	4	X
10	3,25	4 - 5	X
12	3,25	4 - 5	X
15	3,25	4 - 5	X
20	3,25	4 - 5	X
25	4	5	X
30	4	5	X
40	4	5 - 6,3	X
50	4	5 - 6,3	X
60	4	5 - 6,3 - 8	X
80	4	5 - 6,3 - 8	X
100	4	5 - 6,3 - 8	X
Idem, + - électrodes classe V			
6	4 - envers 3,25	-	-
7	4 - envers 3,25	-	-
8	5 - envers 4	-	-
9	5 - envers 4	-	-
10	3,25 - env. 3,25	-	-
12	3,25 - env. 4	-	-
15	4 - envers 4	-	-

Le remplissage des chanfreins peut s'exécuter de différentes manières : à moins que le mode de dépôt ne soit indiqué sur le plan, le soudeur choisira suivant les diamètres d'électrodes dont il dispose (v. graphique *fig.6.8*) et leur qualité, ainsi que suivant le type de soudure, longue ou courte (§ 6.5,e).

L'ordre d'exécution des passes peut être également déterminé par la qualité de l'électrode : ainsi, pour la soudure en passes étroites, si l'on utilise des électrodes donnant lieu normalement

à un dépôt convexe, on devra éviter l'ordre représenté *figure 6.21*,A, qui conduirait à des inclusions de laitier sur une face du chanfrein ; on opérera donc suivant, B . Par contre, l'ordre ainsi évité conviendrait bien si l'on disposait d'électrodes donnant lieu à un dépôt concave (C) qui sont du reste peu indiquées pour le *remplissage* des chanfreins.

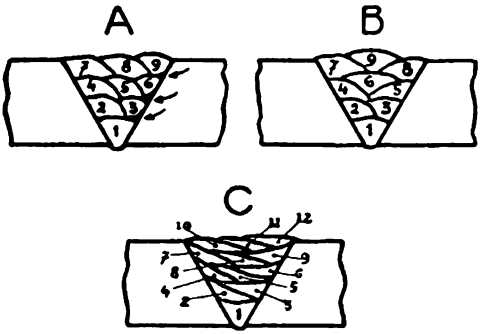


Fig.6.21

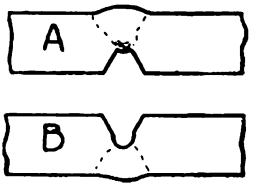


Fig.6.22

La soudure terminée sera reprise à l'envers dans tous les cas indiqués aux tableaux 10 et 11.

Avant d'effectuer la *reprise sur l'envers*, il est indispensable de procéder non seulement à un piquage parfait de l'envers de la soudure exécutée, mais encore à un burinage de cet envers afin de faire apparaître et de pouvoir enlever (*fig.6.22*,A) tous les défauts tels qu'inclusions de laitier, fissures, etc... Pour des travaux de sécurité (chaudières, appareils à pression, châssis de véhicule, etc...), l'envers des soudures est buriné avec un dégorgeoir ou "ravageur" à commande pneumatique. On emploie aussi pour cette opération, un procédé dérivant de l'oxy-coupage : le rainurage au chalumeau (également appelé cannelage, gougeage), beaucoup plus rapide que le burinage mécanique et qui présente en outre les avantages de n'être nullement bruyant et de faire apparaître les défauts, contrairement au burinage mécanique qui tend à les mater, et par suite, à les masquer (1). Depuis quelques années, un autre procédé, le gougeage à l'électrode de graphite et à l'air comprimé, est également utilisé dans le même but (description § 15.2).

Avant la reprise, les envers des soudures ainsi préparées doivent se présenter suivant la *figure 6.22*,B .

Remarque au sujet de la surépaisseur des soudures bout à bout. - Chaque couche de soudure provoque le recuit et par conséquent l'amélioration de la couche inférieure. La couche superficielle n'étant pas recuite présente donc habituellement une structure plus grossiè-

(1) Voir L. MENDEL, Manuel pratique de soudage aux gaz et de coupage thermique. Dunod, édit.

re ; en outre, il s'y localise parfois des défauts tels que des soufflures, des porosités. Il est donc toujours recommandable de déposer au moins une légère passe en surépaisseur, même si la soudure doit être ensuite *arasée*, c'est-à-dire nivelée.

Remarque sur le soudage bout à bout des largets et profilés. - Lorsqu'on assemble en bout des largets ou des profilés, il ne faut laisser subsister aucune amorce de fissure sur les bords et par consé-

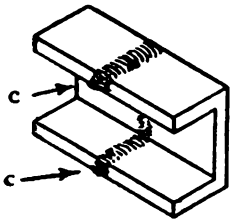


Fig.6.23

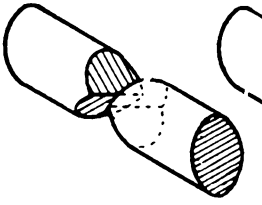


Fig.6.24

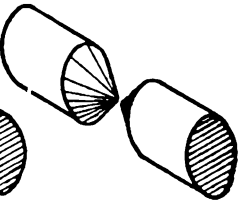


Fig.6.25

quent, après piquage, reprendre les joints sur les tranches (exemple *fig.6.23*,C). Le cordon de soudure doit en somme "faire tout le tour" du profilé.

Soudage bout à bout des barres carrées ou cylindriques. - L'exécution de cette soudure est en principe la même que celle décrite pour les tôles. Le chanfrein en X est toujours préféré au chanfrein en V ; il est exécuté en *sifflet* (*fig.6.24*) , jamais en cône (*fig.6.25*).

Il est recommandé de faire d'abord une passe de fond, puis de retourner la pièce, de piquer l'envers et de déposer la passe de fond sur l'envers, puis de retourner encore et ainsi de suite en alternant les passes sur une face et sur l'autre. On réduira ainsi la déformation.

Bien entendu, comme nous venons de le voir pour les soudures de largets et profilés, la soudure devra être reprise sur les côtés afin de faire tout le tour des barres.

6.12. Exécution des soudures en angle extérieur

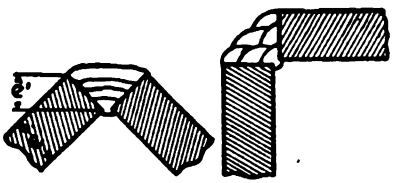


Fig.6.26

Les joints de cette forme sont disposés autant que possible de façon que le chanfrein naturel formé par les champs de tôle se présente à plat (*fig.6.26*). Dans ces conditions, le soudage s'effectue comme s'il s'agissait d'un chanfrein préparé sur tôles d'épaisseur $e' =$ environ les 7/10 de e . Une surépaisseur est cependant réalisée afin d'éviter une diminution de l'épaisseur dans l'angle.

Fig.6.27

La reprise à l'envers après piquage ou burinage, si la pièce peut être retournée, est recommandée pour les soudures devant être étanches.

Si la soudure se présente dans la position de la *figure 6.27* on procédera, quant à la succession des passes, comme s'il s'agissait d'une soudure par recouvrement (§ 6.13).

6.13. Exécution des soudures par recouvrement

Elles seront réalisées (*fig.6.28*): concaves (A) s'il s'agit de simples soudures d'étanchéité, plates (B) s'il s'agit de soudures de résistance ; le cordon bombé (C) est moins conseillé à cause de la présence d'un angle rentrant, défavorable au point de vue fatigue, à la base du cordon. Sauf indication contraire sur le plan, le cordon s'accrochera sur toute l'épaisseur du plat couvrant.

La passe de fond, toujours longitudinale, sera exécutée avec une électrode d'un diamètre approprié à l'épaisseur, suivant les indications ci-dessous :

Epaisseur (mm)	3	4 à 12	13 à 20
Diamètre (mm)	2,5	3,25	4

Cette passe de fond sera déposée avec une intensité élevée. L'emploi d'une électrode permettant l'exécution automatique-manuelle (§ 6.2) est naturellement tout indiqué.

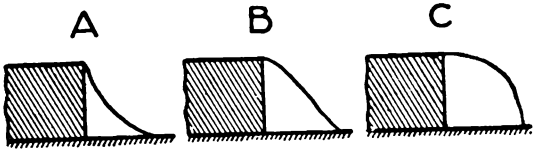


Fig.6.28

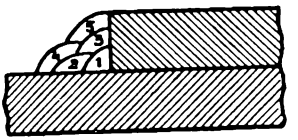


Fig.6.29

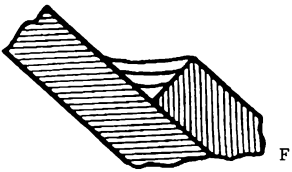


Fig.6.30

Les passes de remplissage du chanfrein naturel formé par les champs de la tôle couvrante et la face de la tôle couverte seront exécutées :

a) Dans le cas le plus fréquent où les pièces se présentent à plat, par passes étroites, superposées comme le montre la *figure 6.29* ;

b) Si les pièces peuvent être disposées suivant la *figure 6.30*, par passes larges à condition que cette méthode ne soit pas contre-indiquée pour des raisons de qualité d'électrode ou de déformations et tensions (§ 6.5.e).

6.14. Exécution des soudures en angle intérieur

Alors que la hauteur d'une soudure par recouvrement est, comme nous l'avons vu, généralement imposée par l'épaisseur du plat couvrant, les dimensions d'une soudure en angle intérieur peuvent varier dans une assez large mesure.

C'est le calcul qui détermine la cote de la *gorge* g à donner au cordon (*fig.6.31*)(1). Dans les travaux de construction soudée de charpentes, ponts, bâtis de machines, etc.., ce calcul doit être effectué par le bureau d'études et la cote g doit alors figurer sur le plan. Il appartient dans ce cas au soudeur d'exécuter un cordon dont la dimension de gorge corresponde à celle imposée.

Il pourra se baser à cet effet sur la mesure de la *largeur* l du cordon qui sera la suivante, en millimètres :

g	l pour un cordon		
	convexe	plat	concave
3	5	6	9
4	7	8	12
5	8,5	10	15
6	10	12	18
7	12	14	21
8	13,5	16	24
10	17	20	30
12	20	24	36

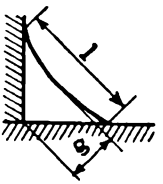


Fig.6.31

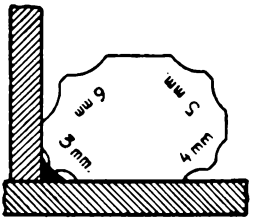


Fig.6.32

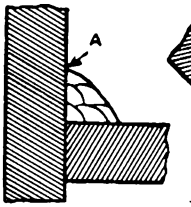


Fig.6.33

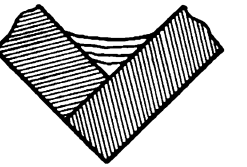


Fig.6.34 Soudure dite en "gouttière".

Bien entendu, cette façon de procéder ne donne qu'un résultat approché. Il est bien préférable de disposer d'un calibre ou d'un jeu de *calibres à gorge* (*fig.6.32*) permettant de vérifier la cote g avec plus de précision.

Si, contrairement au cas précédent, aucune indication n'est donnée au soudeur au sujet des dimensions du cordon à déposer, il

(1) Cette notation g est actuellement remplacée par la notation a dans la norme AFNOR E 04-020 (voir chapitre 7).

devra toujours se tenir au-dessus des cotes suivantes considérées comme des minimums en fonction de l'épaisseur e des tôles ou, si celles-ci sont d'épaisseurs différentes, de l'épaisseur de la plus forte :

e (mm)	g (mm, pour cordons plats)
10	3
15	4
20	5
25	5,5
30	6
40	7
50	7,5

Le mode d'exécution des soudures en angle intérieur dépendra de la position dans laquelle elles se présentent (*fig.6.33* et *6.34*). Les règles à appliquer sont les mêmes que pour les soudures par recouvrement, auxquelles nous renvoyons le lecteur (§ 6.13).

Insistons cependant sur la nécessité d'une forte intensité de courant pour la passe de fond. Dans le cas du soudage par passes étroites, il est fréquent que l'on ait par contre à réduire l'intensité pour le dépôt de la dernière passe afin d'éviter la morsure en A (*fig.6.33*). Observons que ce défaut représenté figure 9.1 D, page 105 fausserait complètement la mesure indirecte de la gorge g par celle de la largeur du cordon.

Emploi d'électrodes à forte pénétration

L'emploi d'électrodes à forte pénétration comme celles de la classe V modifie sensiblement le mode d'exécution et même la conception des soudures en angle intérieur, surtout les soudures en T, très fréquentes en construction.

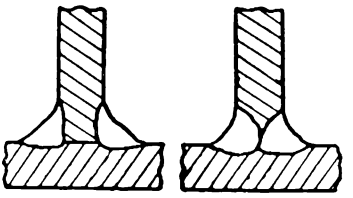


Fig.6.35

En effet, ces électrodes permettent de fondre beaucoup plus profondément dans l'angle et, tout au moins jusqu'à 15 mm et sans aucun chanfreinage, d'obtenir une pénétration *totale*, c'est-à-dire qui supprime toute solution de continuité entre les pièces assemblées. Tout défaut d'angle (*fig.9.2*,D) se trouve ainsi éliminé. La *figure 6.35* montre bien, à cet égard, la différence entre l'emploi des électrodes normales et celui des électrodes à forte pénétration.

Pour les tôles d'épaisseur supérieure à 15 mm, le même résultat peut encore être obtenu, mais avec un chanfreinage partiel en K, à 70°, avec carre de 10 mm. Une économie importante de métal déposé

est de ce fait également obtenue (v. tableau 13, page 118).

6.15. Exécution des soudures sur tranches

Le diamètre de l'électrode se rapprochera le plus possible de la moitié de la largeur l de la soudure (*fig.6.36*), qui est, dans ce cas, soit l'épaisseur totale des tôles, soit la largeur du chanfrein (voir *fig.5.8*). De cette façon, on pourra procéder au soudage en une seule passe longitudinale.

L'intensité du courant de soudage sera plus faible que pour une soudure bout à bout sur mêmes épaisseurs.

Fig.6.36

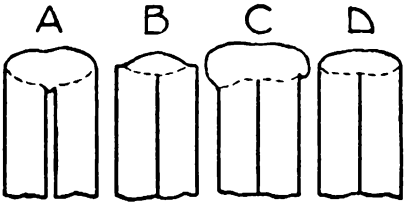


Fig.6.37

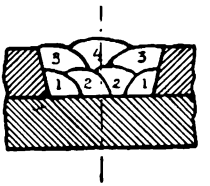


Fig.6.38

La *figure 6.37* montre l'exécution incorrecte (A, B, C) et l'exécution correcte (D) d'une soudure sur tranches sur tôles non chanfreinées.

6.16. Exécution des soudures en bouchons

La première passe se déposera le long de la circonférence intérieure du trou fraisé (*fig.6.38*), les passes suivantes dans l'ordre indiqué sur cette figure.

Le piquage s'effectuera avec la *pointe* du marteau-piquette et, comme la brosse métallique ne peut en général accéder au fond du trou, le piquage sera suivi d'un soufflage des particules de laitier au moyen d'un petit soufflet à main ou à air comprimé.

Il y a un avantage marqué à utiliser dans ce cas des électrodes à enrobage semi-volatil.

Si la pièce couverte est notablement plus épaisse ou plus massive que le plat couvrant, elle doit être au préalable chauffée au feu de forge ou mieux au chalumeau ; à défaut de cette précaution, le refroidissement trop rapide à la zone d'accrochage sur la pièce couverte provoquerait fréquemment la rupture au ras de celle-ci. C'est d'ailleurs à cause de ce danger que certains règlements de construction interdisent l'emploi des soudures en bouchons.

6.17. Exécution des soudures verticales (montantes et descendantes)

Les différents types de joints examinés jusqu'ici peuvent se présenter en position verticale. Les méthodes d'exécution sont alors modifiées de façon à tenir compte des indications générales déjà données au § 6.5,c.

Deux méthodes se présentent : le soudage en montant et le soudage en descendant.

a) Soudure montante

Les soudures montantes sont en général, assez fortement chargées. Leur exécution conduit à un échauffement local important ; aussi ne sont-elles guère réalisables sur pièces de moins de 4 mm d'épaisseur, à moins qu'il s'agisse de soudures très courtes.

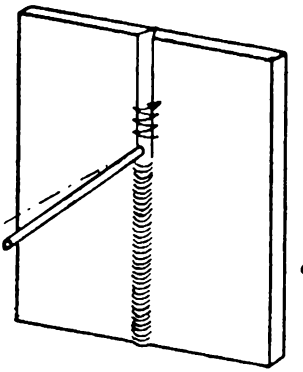


Fig.6.39

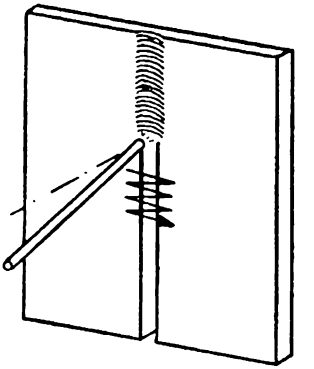


Fig.6.40

L'électrode doit être tenue perpendiculairement à la pièce ou très légèrement inclinée vers le haut (*fig.6.39*). On la soumet à un balancement assez large. Pour les électrodes ayant tendance à donner un cordon trop bombé, on insiste sur les bords et on passe plus rapidement au centre. L'intensité doit être suffisamment réduite, par rapport au soudage à plat, pour que l'électrode puisse être tenue sans que le métal en fusion ne coule vers le bas.

En général, on choisit l'intensité *minimale* correspondant au type d'électrode utilisé (voir tableau 5 , p. 43).

Pour les tôles moyennes et épaisses chanfreinées, ou les soudures verticales en angle intérieur ou par recouvrement sur tôles épaisses, on utilise également la méthode *angulaire*, déjà décrite au § 6.2, *figure 6.5*. On trouvera décrite au même paragraphe, *figure 6.6*, l'exécution des passes de finition en montant.

b) Soudure descendante

Le soudage en descendant s'applique, contrairement au précé-

dent, aux pièces minces, ainsi qu'au dépôt de la passe de fond sur chanfreins verticaux si la soudure peut être reprise à l'envers. Cette méthode aboutit à un cordon plat ou même concave s'il est déposé dans un chanfrein ou un congé.

Cependant, le soudage en descendant est surtout intéressant avec les électrodes à enrobage semi-volatil (classe c), avec certaines électrodes à enrobage basique utilisées en courant continu ("Marine"), avec celles des électrodes à enrobage fusible et épais donnant un dépôt très fluide et par suite fortement concave (classes O et A) et enfin, avec certaines électrodes à forte pénétration (classe V).

Pour l'exécution de cette soudure, l'électrode, dirigée légèrement vers le haut, est soumise en descendant à un mouvement en zigzag assez rapide (*fig.6.40*). Le laitier doit être maintenu *en dessous* de l'arc ; lorsqu'il devient gênant, le soudeur donne un mouvement de "coup de pinceau" vers le bas de façon à le faire tomber.

c) Soudage montant à deux soudeurs

Cette méthode spéciale a été utilisée pour le soudage des pièces de forte et de très forte épaisseur préparées en X ou en double U , par exemple pour la réparation des longerons de locomotives.

Une passe de fond est exécutée *d'un seul côté*, en montant, par le premier soudeur, puis le second burine ou gouge l'envers avec soin et dépose une passe de fond de son côté par la même méthode. Ensuite, les deux soudeurs, après avoir réglé leur poste à la même intensité, procèdent ensemble au remplissage en se tenant le plus possible au même niveau. Ce remplissage s'effectue par soudure angulaire pour les passes rapprochées du fond, et, si le chanfrein est trop large, par passes montantes ordinaires pour le restant. Jusqu'à 50 mm d'épaisseur totale on utilise des électrodes de 4 mm, au-delà, des électrodes de 5 mm.

6.18. Exécution des soudures horizontales sur plan vertical

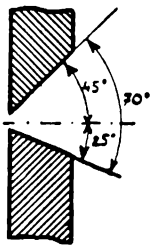


Fig.6.41

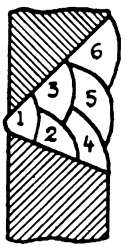


Fig.6.42

Pour les tôles minces, non chanfreinées, on procède toujours par passes étroites, avec intensité réduite comme en soudure montante.

Pour les tôles de plus de 5 mm, il y a intérêt à partir de chanfreins non symétriques (*fig.6.41*) de façon à assurer une meilleure base. Les passes seront étroites et disposées dans l'ordre indiqué *figure 6.42*. On peut également exécuter un cordon par passes angulaires obliques (§ 6.2, *fig.6.7*).

6.19. Exécution des soudures au plafond ou surélevées

Les soudures au plafond sont d'exécution assez difficile. On donne souvent la préférence au courant continu (électrode au pôle +).

Les électrodes doivent être appropriées à ce mode spécial de soudage : celles des classes Rutile-chaux, C et B conviennent le mieux. Les électrodes de la classe R sont généralement moins indiquées : elles obligent à de trop fréquents arrêts pour laisser refroidir le métal fondu et éviter sa chute. Avec les électrodes des classes O et A le soudage au plafond n'est pas réalisable.

L'arc doit être maintenu *très court* et l'électrode perpendiculaire à la pièce. Il est souvent avantageux de la courber à son extrémité afin de pouvoir la maintenir sans trop de fatigue dans la position voulue. On opère soit par passes étroites, soit par passes larges avec balancement très rapide et éventuellement retours en arrière.

Pour les tôles épaisses chanfreinées, dont le soudage au plafond est d'ailleurs rare, l'angle de chanfrein sera d'au moins 100°. Les bords seront largement écartés et si possible on placera au-dessus une tôle mince (*fig.6.43*) afin de faciliter l'accrochage de la première passe.

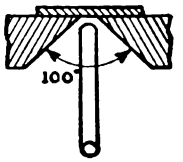


Fig.6.43

L'intensité sera choisie un peu plus faible que pour le soudage à plat des mêmes épaisseurs. On interrompra la soudure pour laisser refroidir aussitôt que l'on constatera que le métal fondu, trop fluide, s'accroche mal et a tendance à tomber.

6.20. Soudage de pièces d'épaisseur différente

Si les épaisseurs ne diffèrent pas de plus du quart de la plus forte, il n'y a pas de difficultés particulières.

Si elles diffèrent davantage, il est nécessaire de choisir l'électrode d'un diamètre tel qu'il puisse y avoir encore une bonne pénétration sur la pièce épaisse sans que la plus mince soit exagérément fondue. Il en est de même pour l'intensité. Il y a lieu également d'obtenir, par une inclinaison appropriée de l'électrode, que la pièce épaisse soit chauffée plus que l'autre (*fig.6.44*).

Fig.6.44

On arrive plus sûrement à de bons résultats en réchauffant au préalable la pièce épaisse à 200 à 300°C au moyen d'un chalumeau oxyacétylénique.

6.21. Longueur minimale des cordons de soudure

Malgré les précautions que l'on peut prendre pour éviter le collage au départ d'un cordon (par exemple allongement de l'arc, § 6.8), la pénétration au départ ne peut être obtenue de façon certaine. D'autre part, à la fin du cordon, il se produit souvent un cratère avec une soufflure, provenant d'une interruption trop brutale de l'arc.

Pour ces deux raisons, la longueur d'un cordon de soudure habituellement considérée dans les calculs (*longueur utile*) est la longueur totale diminuée de deux fois l'épaisseur.

Comme conséquence de cette réduction, il faut éviter de déposer des cordons ayant une longueur inférieure à quatre fois l'épaisseur des pièces. Cette prescription est particulièrement à retenir lorsqu'on exécute des soudures *discontinues* (§ 5.1, *fig.5.2*). Ainsi, pour un cordon discontinu, en angle intérieur, sur tôles de 10 mm, on fera des cordons d'au moins 40 mm et même de préférence 50 mm de longueur.

Bien entendu, cette prescription ne concerne pas le pointage, genre de soudure discontinue mais provisoire, c'est-à-dire dont les éléments sont généralement destinés à être incorporés au cordon d'assemblage proprement dit et ne sont donc plus visibles une fois le travail achevé.

6.22. Rechargements ordinaires (acier doux)

Les rechargements s'effectuent en général au moyen d'électrodes de 4, 5 ou 6,3 mm suivant le volume de métal à déposer et l'épaisseur de la pièce à recharger (voir graphique *figure 6.8* et tableau 8). La surface de celle-ci doit être bien mise à vif.

On opère le plus souvent par passes étroites, dont le dépôt s'effectue comme il est indiqué *figure 6.45* . Les chenilles doivent être modérément bombées. Après la première passe, l'électrode doit être tenue inclinée de façon à fondre le bord de la passe précédente et à éviter les sillons (*fig.6.46*).

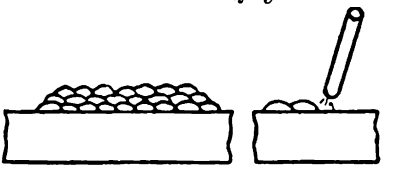


Fig.6.45 Fig.6.46

Fig.6.47

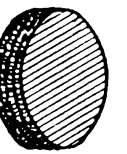


Fig.6.48

Il faut veiller soigneusement à l'élimination du laitier entre chaque passe. C'est pourquoi on utilise avantageusement des électrodes donnant peu de laitier. Les électrodes donnant un dépôt concave ne conviennent naturellement pas pour les travaux de rechargement.

Les rechargements sur paroi verticale et au plafond s'effectuent avec des électrodes de plus petit diamètre (3,25 ou 4 mm) et avec une intensité plus faible. On emploie dans ce cas la passe étagée (*fig. 6.6*).

Les rechargements sur surfaces cylindriques sont exécutés :

a) Pour les pièces dont le diamètre est faible par rapport à la longueur : longitudinalement (*fig.6.47*) en faisant tourner la pièce après chaque passe de manière à souder toujours à plat ;

b) Pour les pièces dont le diamètre est grand par rapport à la longueur : par passes circulaires (*fig.6.48*) en faisant tourner la pièce au fur et à mesure de l'avancement de manière à souder toujours en montant légèrement.

Les rechargements "anti-usure", qui s'exécutent maintenant beaucoup plus souvent que les rechargements ordinaires, seront étudiés spécialement au chapitre 12.

CHAPITRE 7

REPRÉSENTATION SYMBOLIQUE DES SOUDURES SUR LES DESSINS

7.1. NORMALISATION

Cette représentation symbolique a fait l'objet de la norme AFNOR E 04-020 publiée en avril 1972 et dont le but est de "faciliter la lecture des dessins comportant des assemblages soudés en précisant l'emplacement de la soudure à réaliser, son type et les dimensions principales à respecter".

Cette norme, dont nous donnerons l'essentiel, prévoit :

a) Un symbole élémentaire, obligatoire ;

b) Eventuellement, - un symbole supplémentaire
- une cotation conventionnelle
- des indications complémentaires.

7.2. SYMBOLES ÉLÉMENTAIRES

Ils sont repris sur le tableau 12 ci-après :

TABLEAU 12

	sur bords relevés (bords relevés complètement fondus)(1)		en demi U (ou en J)
			reprise à l'envers
	sur bords droits		soudure d'angle
	en V		en entailles (ou en bouchons)
	en demi V		
	en Y		par points
	en demi Y		en ligne continue avec recouvrement
	en U (ou en tulipe)		

(1) Cette préparation n'est pas utilisée en soudage à l'arc à l'électrode enrobée mais seulement en soudage oxyacétylénique ou en soudage TIG (chapitre 17).

On remarquera qu'il n'est pas spécifié de symbole pour les soudures en X ; celles-ci sont représentées par deux symboles V, l'un à l'endroit, situé au-dessus, l'autre renversé, situé au-dessous (voir § 7.5).

7.3. Symboles supplémentaires

Ils servent notamment à préciser le profil désirable du cordon : — soudure plate ; ⌒ soudure convexe ; ⌣ soudure concave.

Le symbole ⚑ signifie que la soudure est à exécuter non à l'atelier mais lors du montage au chantier.

7.4. Ligne de référence

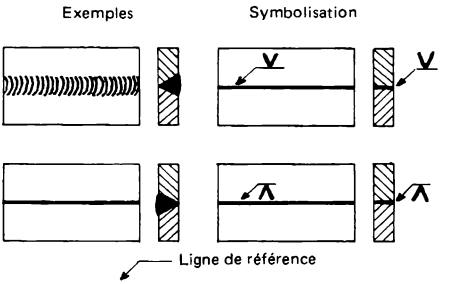


Fig.7.1

La ligne de référence est une ligne horizontale suivie d'une ligne oblique descendante terminée par une flèche. La *fig.7.1* montre à titre d'exemple comment le symbole doit être inscrit sur le dessin. Ce symbole est donc reproduit à l'endroit et au-dessus de la ligne de référence si la surface extérieure de la soudure est du côté de la ligne représentant le joint ; il est reproduit à l'envers et au-dessous de la ligne de référence si la surface extérieure de la soudure est de l'autre côté de la ligne représentant le joint.

7.5. Exemples d'application de symboles élémentaires et supplémentaires

Soudure sur bords relevés plate avec reprise à l'envers plate

Soudure sur bords droits convexe

Soudure en V plate avec reprise à l'envers

Soudure en V double (ou en X) convexe

Soudure d'angle concave.

7.6. COTATION

Pour les soudures bout à bout, la cote s (à remplacer par l'épaisseur indiquée en mm) représente la distance minimale de la surface de la tôle à la racine du cordon. Elle ne peut être en aucun cas supérieure à l'épaisseur de la tôle ou, si les deux tôles sont d'épaisseur différente, de la plus mince d'entre elles. Exemples *fig.7.2*.

Pour les soudures d'angle continues, la *fig.7.3* montre que la cote a à indiquer à gauche du symbole est la hauteur de la *gorge*, c'est-à-dire la hauteur du plus grand triangle isocèle inscrit dans la section du cordon (voir § 6.14).

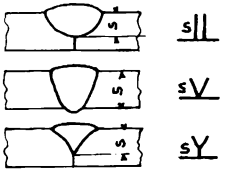


Fig.7.2

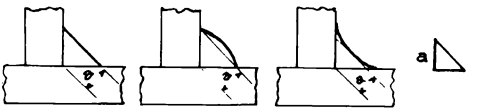


Fig.7.3

Pour les soudures d'angle discontinues, la ligne de référence sera surmontée de l'inscription a n × l × (e) et pour les soudures d'angle discontinues à éléments alternés, de l'inscription

$$\frac{a\ n \times l\ (e)}{a\ n \times l\ (e)}$$

e = distance de deux éléments de soudure voisins

l = longueur de l'élément de soudure (sans les cratères terminaux)

n = nombre d'éléments de soudure.

7.7. INDICATION ÉVENTUELLE DU PROCÉDÉ DE SOUDAGE

Cette indication est symbolisée par un chiffre figurant à droite de la ligne de référence. Ce chiffre renvoie à la norme AFNOR E 04 - 021 de novembre 1972 qui donne la nomenclature des procédés de soudage et de brasage.

CHAPITRE 8
DILATATION ET RETRAIT

8.1. DILATATION ET RETRAIT EN SOUDAGE À L'ARC. PRINCIPES

Lorsqu'une pièce est chauffée *entièrement* et librement, elle se dilate. Si on la laisse refroidir d'une façon uniforme, le retrait la ramène à ses conditions initiales.

Mais ce n'est pas le cas dans les opérations de soudage. Dans celles-ci en effet, le chauffage n'intéresse qu'une faible partie de la pièce ; il est donc fortement *localisé*, surtout en soudage électrique. Au cours du chauffage, la partie chauffée se dilate et, le plus souvent, au cours de ce chauffage, elle peut se dilater librement car les deux pièces à assembler ne sont pas encore fixées rigidement l'une à l'autre.

Mais, au cours du refroidissement, la contraction n'est plus aussi facile. Elles entraîne, si les parties voisines de la soudure sont suffisamment chaudes (cas du soudage au chalumeau) ou si elles peuvent se déplacer, des déformations plus ou moins importantes. Au contraire, si ces parties sont froides ou bien bridées, c'est-à-dire soit rigides par elles-mêmes (par leur masse, par leur forme), soit fixées à un support rigide, il se produit des *tensions* susceptibles, lorsqu'elles sont importantes, de conduire à des fissures ou à des ruptures. Ces accidents sont d'autant plus à craindre :

- que le métal de base et le métal déposé sont plus résistants, donc plus durs et plus sensibles à la trempe, qui réduit alors fortement leur capacité de déformation. C'est pourquoi les règlements de construction soudée se montrent encore prudents vis-à-vis de l'emploi des aciers à haute résistance.
- Que la température des pièces à souder est plus basse et favorise par conséquent leur refroidissement rapide. C'est ainsi que des précautions toutes spéciales sont à prendre lorsque l'on soude à l'extérieur par temps très froid, surtout si l'action du vent s'ajoute à celle de la basse température.

Le préchauffage au chalumeau des abords du joint est de plus en plus utilisé lorsque les conditions A ou B interviennent.

Dans presque tous les cas, le retrait tend à un *raccourcissement des parties qui ont été chauffées le plus* (le plus fortement ou le plus longtemps) par rapport à celles qui l'ont été le moins (par conséquent, raccourcissement des zones voisines de la fin de la soudure, tout au moins dans les soudures courtes).

Les effets constatés résultent de la composition des différents effets élémentaires suivants :

a) La contraction simple (*fig.8.1*) ou diminution de largeur du joint, bien connue des soudeurs qui procèdent au pointage de pièces libres et qui constatent après pointage une diminution de l'écartement initial. Il ne faut pas confondre la contraction simple avec l'effet de serrage (voir plus loin). Si les pièces sont bridées et soudées en régime froid, c'est-à-dire en leur laissant le temps de se refroidir

Fig.8.1

Fig.8.2

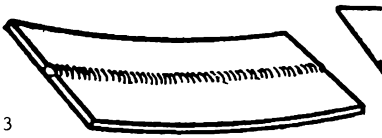


Fig.8.3

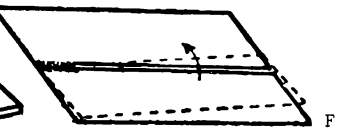


Fig.8.4

entre chaque passe, la contraction simple mettra le joint en tension. Toutefois, celle-ci ne peut avoir de conséquences inquiétantes que s'il existe une courte distance entre la soudure et les parties bridées. Dans le cas contraire (par exemple noeuds de charpentes en profilés légers) les barres soudées par leurs extrémités et qui ne sont jamais parfaitement rectilignes se tendront : les tensions résiduelles seront généralement négligeables.

b) La déformation transversale ou angulaire ou effet de pliage (*fig. 8.2*), surtout marquée pour les soudures sur chanfrein en V . Elle provient du retrait plus prononcé dans le haut que dans le bas du cordon. Elle est *plus* accentuée lorsqu'on soude par passes étroites que lorsqu'on soude par passes larges.

c) La déformation longitudinale ou effet de cintrage (*fig.8.3*) surtout importante pour les joints de grande longueur, et dont l'origine réside également dans le retrait plus accentué de la face supérieure. Elle est *moins* marquée pour les soudures faites en passes étroites.

d) L'effet de serrage (*fig.8.4*) qui est une conséquence de la contraction simple et provient de ce que celle-ci s'effectue de proche en proche le long du joint. Comme le précédent, cet effet est *moins* marqué pour les soudures en passes étroites.

En somme, on peut dire que plus l'échauffement progresse *rapidement* dans une direction, plus on tend dans celle-ci vers les conditions d'un chauffage uniforme et simultané pour lequel les déformations (ou tensions) seraient nulles. Par suite, plus celles-ci seront *faibles* dans cette direction. De ce fait on peut déduire les recommandations que nous avons déjà données au § 6.5 au sujet du choix du genre de passe, choix qui est encore souvent laissé à l'appréciation du soudeur.

8.2. RÉDUCTION ET CORRECTION DES EFFETS DE LA DILATATION ET DU RETRAIT

Les différentes déformations examinées au paragraphe précédent peuvent être empêchées par bridage jusqu'à refroidissement complet ; mais cela conduit alors, inévitablement, à la formation de tensions.

Dans la plupart des cas, on ne peut éviter complètement et *à la fois* les déformations et les tensions résiduelles. On peut, par contre, prendre diverses mesures pour réduire les unes ou les autres ou pour les corriger après soudage. Ces mesures sont de différentes catégories :

a) Déformation préalable en sens inverse de la déformation prévue

Cette méthode n'est pas d'une application courante. Elle nécessite en effet une connaissance précise de la déformation qui se produira. Or celle-ci échappe en général au calcul et même à la prévision car elle est fortement influencée par le régime de soudage : durée du dépôt, durée des arrêts entre chaque passe, etc..; elle dépend aussi des tensions pouvant exister *initialement* dans la pièce si celle-ci n'a pas été préalablement soumise à un recuit de détente, et qui sont toujours inconnues.

Ce procédé ne peut donc être utilisé que dans les travaux de série ou tout au moins dans les travaux se reproduisant de temps en temps et s'effectuant exactement dans les mêmes conditions sur des pièces de fabrication et de préparation identiques. La déformation de soudage est alors mesurée et notée une fois pour toutes sur la première pièce, qui sert en quelque sorte de prototype.

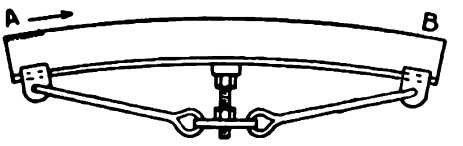


Fig.8.5

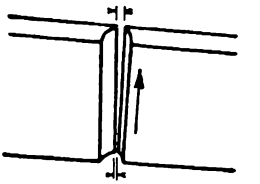


Fig.8.6

La déformation préalable peut être une déformation proprement dite des pièces à souder, par exemple le cintrage d'un profilé sur lequel un rechargement longitudinal doit être effectué (*fig.8.5*).

Elle peut être une disposition des pièces hors de parallélisme c'est-à-dire une déformation du joint : tel est l'*écartement différentiel* utilisé pour la réparation de certaines pièces planes, épaisses et de grandes dimensions comme les longerons de locomotives (8.6).

b) Répartition de l'échauffement

Les modes opératoires qui poursuivent ce but sont assez nombreux. Ils consistent tous à répartir l'échauffement le plus simultanément et le plus symétriquement possible entre les différentes parties de la pièce à souder.

Le premier moyen qui vient à l'esprit consiste à faire exécuter le travail par plusieurs soudeurs, placés symétriquement par rapport à la pièce, de façon à mener l'opération de soudage *aussi rapidement que possible*. Cette façon de procéder s'applique particulièrement bien aux joints de grande longueur. A titre d'exemple, on procédera ainsi pour le soudage d'un joint en T (8.7) de deux ou trois mètres de long, afin d'éviter l'effet de cintrage (§ 8.1.c). Un soudeur opérera sur chaque face, et non point d'un bout à l'autre, mais par portions convenablement réparties ; les deux opérateurs souderont ensemble la

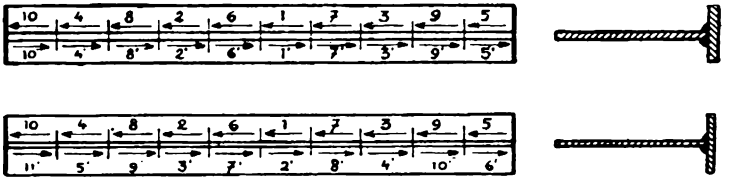



Fig.8.7 (au-dessus) et 8.8 (en-dessous)

même portion s'il s'agit de pièces épaisses ; s'il s'agit de pièces minces, le deuxième sera décalé par rapport au premier du temps nécessaire à l'exécution d'une portion (*fig.8.8*) (les portions marquées du même numéro sont soudées en même temps). Pour éviter de multiplier les reprises, on adoptera pour la longueur des portions celle correspondant au dépôt d'une électrode entière. Pour conduire le travail avec le maximum de rapidité dans le cas de la soudure faite en une passe, on ne piquera le laitier qu'aux reprises ; le piquage complet se fera une fois le soudage terminé sur toute la longueur (voir § 6.10).

Le soudage en montant à deux opérateurs (§ 6.17,C) rentre également dans le cadre de la lutte contre la localisation de l'échauffement : il a pour but essentiel d'éviter les déformations ou les tensions résultant de l'effet de pliage.

Il en est de même de l'alternance des passes sur chaque face dans le cas du soudage bout à bout de barres carrées ou cylindriques (§ 6.11, *fig.6.24*) .

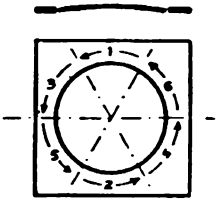


Fig.8.9

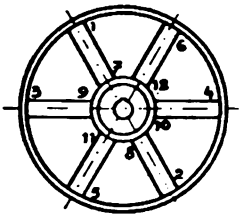


Fig.8.10

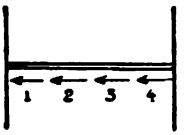


Fig.8.11

Le soudage d'un disque plat dans un orifice circulaire (*fig. 8.9*) applique le même principe. Dans ce cas, on peut combiner la lutte contre la localisation de l'échauffement avec la création d'une *zone élastique* qui se tendra par suite du retrait et contribuera ainsi à éliminer les tensions : il suffit pour cela de galber légèrement le disque comme le montre la figure.

Dans la construction des volants, poulies, roues, engrenages soudés, on évitera de même le "faux-rond" difficile à corriger, en alternant suivant la *figure 8.10* les différentes passes assemblant les bras à la jante et au moyeu.

Enfin, le soudage à *pas de pèlerin* (*fig.8.11*) rentre dans le même ordre d'idées ; il réduit l'effet de cintrage ou déformation longitudinale en réalisant une répartition plus uniforme de la température tout le long du joint.

c) Retardement maximal du bridage

On soudera la longueur d'un joint, ou les différents joints d'un ensemble, de façon telle que la plus grande partie possible des soudures soit exécutée sur pièces non bridées. On ira donc toujours des parties bridées vers les parties libres : les déformations pourront ainsi se faire, et on les corrigera éventuellement au cours du travail.

Deux exemples feront bien comprendre l'application de ce principe :

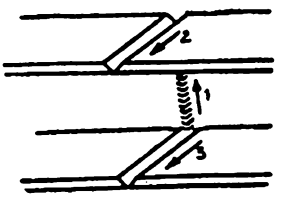


Fig.8.12

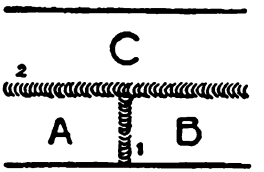


Fig.8.13

a) Pour souder bout à bout deux profilés tels que des fers U (*fig.8.12*) , on commencera par la soudure de l'âme et on terminera par celle des ailes.

b) Si l'on doit souder trois tôles suivant la *figure 8.13* on assemblera d'abord les tôles A et B puis l'ensemble ainsi réalisé sera soudé à la tôle C .

d) Correction après soudage

Nous traiterons brièvement cette question, qui n'est d'ailleurs plus, en général, du domaine du soudeur, et dont l'exposé complet dépasserait le cadre que nous nous sommes tracé.

La correction des déformations ou la réduction des tensions après soudage peuvent s'effectuer par trois groupes de méthodes :
- Emploi d'une action mécanique seule : redressage à froid au marteau (tôles minces), à la presse, etc..
- Emploi d'une action mécanique conjuguée avec un apport de chaleur : redressage à chaud au marteau, à la presse, etc.., après chauffage total ou partiel suivant le cas.
- Emploi d'un apport de chaleur seul :

. Pour supprimer les déformations : *chaudes de retrait*, mettant à profit le même phénomène que celui qui conduit aux déformations de soudage. On cherche par des chauffes locales, généralement effectuées au chalumeau oxyacétylénique ou oxy-propane et suivies d'un refroidissement, à provoquer une contraction des zones qui, par suite du soudage, sont restées allongées par rapport aux zones voisines de la soudure. Nous en montrons deux exemples aux *figures 8.14* et *15* ; la premièr

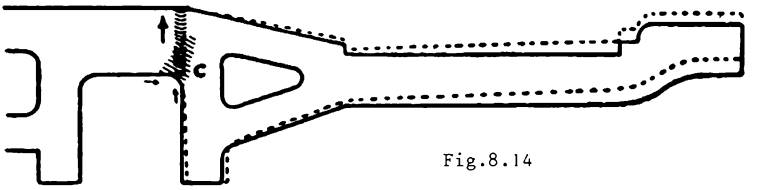


Fig.8.14

montre la méthode adoptée pour redresser par simple chauffe locale en C (zone hachurée) un longeron de locomotive déformé par suite du soudage ; la seconde représente le "tendage" par chaudes de retrait d'une paroi plane gondolée (fond de réservoir).

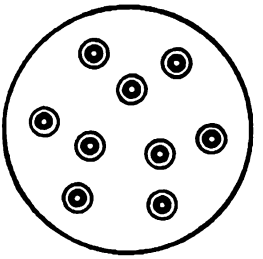


Fig.8.15

. Pour supprimer les tensions résiduelles : *recuit de détente*. En chauffant uniformément (ou dans certains cas localement) la pièce soudée à des températures de l'ordre de 500 à 650°C, on permet aux tensions résiduelles de se libérer par l'écoulement du métal, devenu suffisamment plastique à cette température ; cette opération est souvent imposée à des constructions dont la sécurité de marche est essentielle, comme celle des chaudières et des réservoirs à pression (chauffage total, au four), celle des tuyauteries à haute pression (chauffage du joint et de ses

abords). On pousse dans certains cas le chauffage jusqu'à la température de recuit complet (850 à 900°C).

CHAPITRE 9
CONTRÔLE DE LA QUALITÉ

9.1. PRINCIPES DU CONTRÔLE DE LA QUALITÉ D'EXÉCUTION DES SOUDURES

Les méthodes de contrôle de la qualité d'exécution des soudures sont à l'heure actuelle très nombreuses. Elles peuvent être :

a) Destructives, c'est-à-dire exigeant la destruction de la pièce soudée afin de permettre l'examen de sa structure interne et éventuellement la détermination, sur des éprouvettes prélevées dans la soudure, des propriétés mécaniques du joint ou de ses différentes parties ;

b) Semi-destructives, c'est-à-dire nécessitant le prélèvement, dans les cordons de soudure, de petites portions qui sont soumises à un contrôle destructif puis remplacées par soudage ou par tout autre moyen ;

c) Non-destructives, c'est-à-dire s'effectuant sur les pièces terminées sans aucune altération de celles-ci.

Nous examinerons surtout, dans ce qui suit, les méthodes de contrôle qui sont à la portée du soudeur ou du chef-soudeur et qui n'exigent pas l'intervention d'un personnel et d'un matériel spéciaux.

9.2. DÉFAUTS D'EXÉCUTION DÉCELÉS PAR L'EXAMEN VISUEL DES SOUDURES

Un simple examen visuel des soudures permet déjà de faire d'intéressantes constatations :

a) A l'endroit de la soudure :

On pourra constater les défauts de forme suivants (*fig.9.1*) :

A) Soudure trop chargée : On n'observe guère ce défaut dans les soudures exécutées à plat, sauf pour les tôles minces soudées avec une trop grosse électrode. Par contre, il peut se présenter dans les soudures montantes par suite du choix incorrect du diamètre d'électrode ou de l'intensité. Ce défaut conduit à un gaspillage d'électrodes, de main-d'oeuvre de soudage et souvent de meulage.

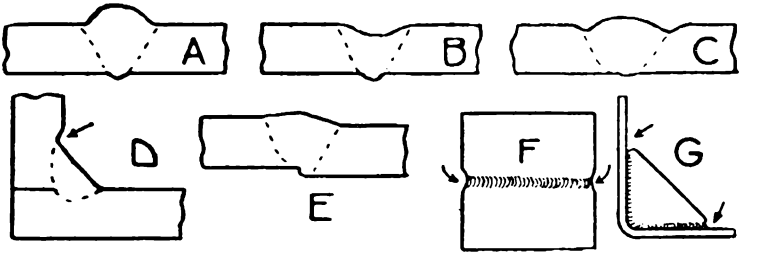


Fig.9.1
Défauts de forme ou géométriques

La résistance du joint, particulièrement vis-à-vis de la fatigue * , n'est nullement augmentée par une surépaisseur excessive, *au contraire*, surtout si le raccordement du bourrelet à la surface de la tôle présente, comme c'est souvent le cas, un angle vif.

B) Soudure trop peu chargée : Ce défaut, provenant d'un dépôt insuffisant de métal ou, s'il est local, d'une mauvaise reprise, compromet évidemment la résistance du joint. On peut y remédier par rechargement après piquage soigné de la surface.

C) Caniveaux ou morsures le long du cordon.

D) Morsures ou affouillement dans une soudure d'angle :

Ces défauts proviennent de l'emploi d'une intensité trop forte pour les passes latérales (voir *fig.6.33*) ou, dans le cas d'une passe large, d'un passage trop rapide sur les bords (en *a*, *fig.6.4*). Ils compromettent également la résistance mais peuvent être corrigés par rechargement.

E) Dénivellation des bords : Ce défaut se constate mieux à l'envers du joint : (voir b), examen de l'envers).

F et G) Effondrements aux extrémités des cordons : mêmes remarques que pour C et D .

Fig. 9.2 G) Poche de laitier apparaissant à la surface, après piquage. Ce défaut est plutôt un défaut de liaison. Il compromet la résistance et l'étanchéité.

b) A l'envers de la soudure :

L'envers des soudures bout à bout ainsi que celui des soudures en angle extérieur doivent présenter un léger bourrelet aussi régulier que possible et bien lié aux arêtes inférieures du joint ou du chanfrein.

Trois défauts importants peuvent être décelés par un examen de l'envers du joint :

Figure 9.1 E : Dénivellation des bords, défaut géométrique provenant d'un mauvais ajustage ou d'un mauvais guidage des bords (absence de pointage ou d'autre moyen de fixation). Il compromet la résistance du joint, notamment à la fatigue * car il le fait travailler dans de mauvaises conditions ; il subsiste d'ailleurs souvent dans ce cas une amorce de cassure constituée par un angle vif.

Figure 9.2 A : Manque de traversé, également appelé manque de pénétration (1) résultant d'une fusion qui n'intéresse pas toute l'épaisseur. Il se constate par la présence au dos du joint d'une rainure plus ou moins continue. Ce défaut peut provenir :

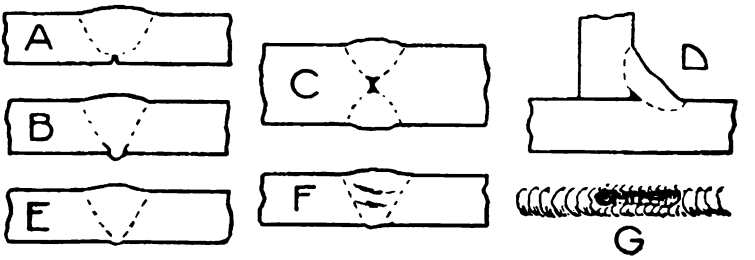


Fig.9.2 Défauts de liaison.

De l'emploi de chanfreins trop peu ouverts, ou mal exécutés ;
D'un écartement insuffisant des bords ;
D'un avancement trop rapide ;
D'une intensité trop faible ;
De l'emploi d'une trop grosse électrode pour la passe de fond ;
D'une mauvaise observation du traversé.

Ce défaut de liaison compromet sérieusement la résistance du joint, surtout vis-à-vis de la fatigue * ou des chocs. On peut cependant y remédier, lorsque les deux faces sont accessibles, par un burinage de la racine et une reprise à l'envers (§ 6.11, *fig.6.22*).

Figure 9.2 B : Manque de traversé avec collage à la racine par coulée de métal d'apport. C'est, si l'on veut, un "*faux traversé*". On le décèle par un examen attentif du bourrelet d'envers : celui-ci, qui peut paraître plus ou moins lié aux bords, est cependant, dans ce cas, étroit et souvent allongé ("chandelles") ; en le frappant au marteau, on le casse assez facilement, ce qui laisse alors apparaître les arêtes inférieures non fondues.

Ce défaut provient en général, contrairement au précédent, d'un *écartement excessif* qui empêche le métal d'apport de se lier au métal de base dans le fond du chanfrein. Il a pratiquement les mêmes inconvénients que le manque de traversé proprement dit.

---

(1) Nous préférons réserver le terme de "pénétration" à la profondeur à laquelle le métal de base est fondu par l'arc (§ fig. 1.5) ; le "manque de pénétration" ainsi compris serait donc, à proprement parler, un collage.

c) Fissures

A l'endroit comme à l'envers, et dans le cordon même comme sur ses bords, peuvent se former des fissures, qui sont évidemment parmi les défauts les plus dangereux.

Lorsqu'elles sont très fines, elles ne peuvent être décelées qu'à la loupe, et mieux encore après sablage de la surface.

Les fissures sont généralement dues à des tensions de retrait excessives résultant de la mauvaise conduite des opérations de soudage (§ 8.1) ou bien à l'emploi d'électrodes trop sensibles à la trempe (§ 3.5) ou bien encore à la mauvaise soudabilité du métal de base. Leur danger résulte de ce qu'elles peuvent s'étendre progressivement lorsque l'assemblage est mis en service, et conduire un jour à sa rupture complète, notamment à la suite d'effets de fatigue *.

9.3. Défauts d'exécution internes

Ces défauts, évidemment invisibles, sont principalement (*fig. 9.2*) : C : Manque de traversé sur chanfrein en X ;
D : Défaut d'angle ou manque de pénétration dans un cordon d'angle.
E : Collage ou "manque de pénétration" proprement dit.
F : Inclusions de laitier sous forme de plages.

Nous parlerons plus longuement de ces défauts dans le paragraphe suivant.

9.4. Défauts d'exécution décelés par l'examen de la cassure

Les essais dont il s'agit, qui sont évidemment destructifs, n'ont pas pour but de déterminer la résistance effective des soudures ; cette détermination ne pourrait se faire en effet sans une *mesure* des efforts imposés à la pièce essayée, et l'atelier de soudage ne dispose pas, en général, du matériel nécessaire à cette mesure.

Les épreuves très simples décrites ci-après servent à donner à l'opérateur une idée de la qualité d'exécution de ses soudures, et cela surtout par un examen de leur *cassure*. Ces épreuves doivent donc être conduites de façon à produire celle-ci en plein dans le joint soudé.

Nous recommandons vivement aux soudeurs débutants et même à tous les soudeurs de procéder eux-mêmes le plus souvent possible à un tel contrôle. Celui-ci, en leur *montrant* leurs fautes d'exécution, les incitera à s'en corriger.

L'examen de la cassure d'un joint soudé ne donne d'indications intéressantes qu'à partir de 3 à 4 mm d'épaisseur.

Pour les épaisseurs allant de 3 à 10 mm on procède à un pliage à l'étau sur une bande de 80 à 100 mm de largeur découpée dans la tôle soudée et meulée sur ses deux faces à ras de la tôle. Pour les soudures exécutées sur une face, le pliage peut se faire sur l'endroit ou sur l'envers ; ce dernier, qui tend à ouvrir la racine de la soudure, décèle immédiatement le manque de traversé. L'*angle* de pliage avant cassure est variable, en raison des conditions mal définies de l'essai ainsi effectué. On a été parfois tenté de considérer cet angle comme une mesure de la qualité de la soudure. Il n'en est rien, car par suite de ces conditions mal définies, ce n'est *pas à cet angle* qu'il faut attacher de l'importance, mais bien comme nous le verrons plus loin, à l'*aspect* même de la cassure, malheureusement non chiffrable.

Pour les tôles épaisses (plus de 10 mm), le pliage à l'étau devenant très difficile, nous recommandons le simple examen de la cassure sur une pièce cassée en pleine soudure, au marteau, après sciage et burinage comme le montre la *figure 9.3*.

La cassure d'une soudure doit présenter un grain fin et uniforme (*fig.9.4*) . Les défauts suivants peuvent donc apparaître :

a) Manque de traversé (*fig.9.5*) . Ces aspect confirme l'examen de l'envers ;

b) Faux-traversé (*fig.9.6*) ;

c) Collage (*fig.9.7*) . Le collage parallèle aux faces des chanfreins est clairement mis en évidence par l'apparition, dans la cassure, de l'une de ces faces. Le collage est dû à l'emploi d'une intensité de courant trop faible pour l'épaisseur de métal soudé ;

d) Plages de laitier (*fig.9.8*) . Ce défaut, assez fréquent, résulte de la négligence du soudeur qui n'a pas procédé au nettoyage d'une passe avant le dépôt de la suivante. La résistance de la soudure est affaiblie, surtout à la flexion ou au pliage ;

e) Soufflures (*fig.9.9*) et piqûres. Les soufflures sont de petites poches de gaz qui peuvent être dues :

Soit à une mauvaise qualité du métal de base ou de l'électrode ;
Soit à l'emploi d'électrodes ayant séjourné dans un endroit humide (en particulier les électrodes de la classe B) ;
Soit à la tenue d'un arc trop long ;
Soit enfin à l'emploi d'une intensité excessive.

Lorsque les poches gazeuses sont de très petites dimensions on les appelle *piqûres*. Dans ce cas, on ne peut plus les apercevoir dans la cassure. Il faut recourir à la macrographie (§ 9.6) ou à la radiographie (voir plus loin).

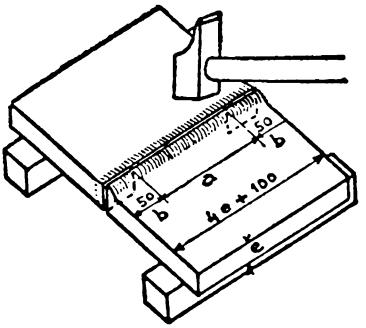


Fig.9.3

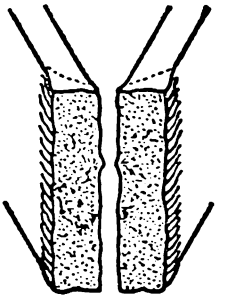


Fig.9.4

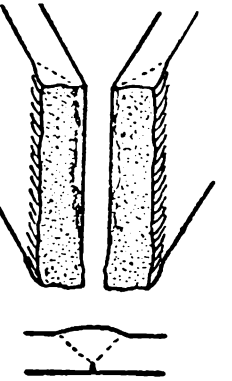


Fig.9.5

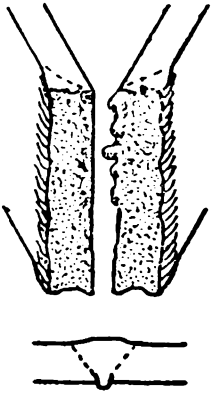


Fig.9.6

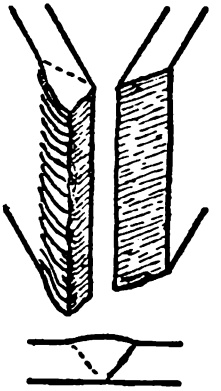


Fig.9.7

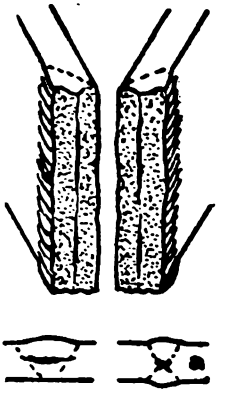


Fig.9.8

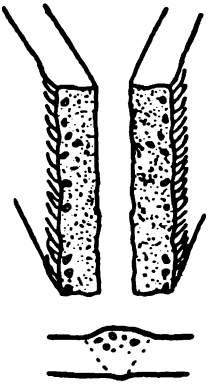


Fig.9.9

Les soufflures, ainsi que les piqûres, lorsque celles-ci sont en grand nombre, compromettent la qualité du joint et notamment son étanchéité.

9.5. Remarque importante sur les défauts d'exécution

On voit que tous les défauts ci-dessus peuvent avoir pour cause une mauvaise préparation de la soudure, un métal de mauvaise soudabilité, une intensité de courant mal choisie, et surtout un *manque d'habileté de l'opérateur*.

Cette dernière cause a été souvent sous-estimée, jusqu'ici.On a voulu faire croire, en effet, que moyennant l'emploi d'un matériel bien choisi et notamment d'électrodes de qualité reconnue, il était très facile de souder convenablement. Cela reviendrait à nier l'uti-

lité d'un apprentissage du soudage à l'arc. Ce point de vue était évidemment insoutenable.

A l'heure actuelle au contraire, on attache avec raison la plus grande importance à la *qualité de la main-d'oeuvre* et on exige que cette qualité soit contrôlée. S'*il est en effet impossible de faire une bonne soudure avec une mauvaise électrode, il est par contre parfaitement possible de faire une mauvaise soudure avec une bonne électrode,* surtout lorsqu'il s'agit de souder dans un plan vertical, cas très fréquent, ou au plafond.

L'habileté du soudeur n'est d'ailleurs pas seule en cause et nous insistons sur ce point : sa *conscience professionnelle* est également un facteur important dans l'exécution des travaux de soudage.

Par exemple, si le soudeur exécute d'une façon parfaite une éprouvette lorsqu'*il sait* que cette éprouvette servira à juger sa capacité, il peut être amené néanmoins, par le désir de gagner du temps, à attacher moins de soin au piquage du laitier, ou encore à utiliser un courant excessif, lors de la réalisation du travail. Pour l'exécution de travaux de *qualité* et lorsqu'il est payé aux pièces ou à la prime, le soudeur doit réagir contre une telle tendance qui témoignerait d'un manque de conscience professionnelle. Il sera d'ailleurs en général, dans de tels cas, mis en face de ses responsabilités par l'obligation de poinçonner à son chiffre les cordons de soudure qu'il a exécutés. Ceux-ci seront alors contrôlés soit par sondages (fraisage local, trépanage § 9.6), en des endroits désignés par le contrôleur de la construction, soit sur toute leur longueur (contrôle par radiographie ou par ultrasons § 9.7). Si l'atelier ne peut disposer de ces moyens de vérification de la qualité, le soudeur sera étroitement suivi pendant son travail par un contrôleur.

9.6. Macrographie

Ce procédé de contrôle consiste à attaquer par un réactif chimique approprié la surface, préalablement polie avec soin, d'une soudure sectionnée. L'attaque fait ressortir les différentes zones du joint (métal de base, métal déposé), la profondeur de la pénétration, l'ordre de dépôt des couches successives, la forme de celles-ci et les défauts de liaison. Les deux réactifs les plus couramment utilisés sont les suivants :

a) Eau : 100 cm^3 ; iodure de potassium : 20 g ; iode : 10 g .

b) Eau : 100 cm^3 ; persulfate ammonique : 10 à 20 g .

Le procédé, qui n'est intéressant qu'à partir de 5-6 mm d'épaisseur, peut être destructif. C'est le cas lorsqu'on l'applique à des éprouvettes de dimensions relativement importantes découpées dans des joints soudés (*fig.9.10*).

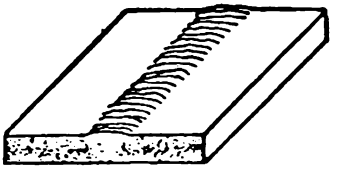


Fig.9.10

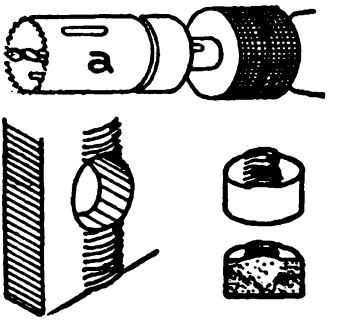


Fig.9.11

Mais il présente surtout de l'intérêt lorsqu'il est *semi-destructif*. Tel est par exemple le *trépanage*, imposé par certaines réglementations aux Etats-Unis. Cette méthode consiste dans le prélèvement dans le cordon de soudure, en des endroits désignés par le contrôleur de la construction, d'un bouton découpé au moyen d'une petite scie cylindrique *a* (*fig.9.11*). Ce bouton est scié perpendiculairement à l'axe du cordon, poli puis attaqué comme nous venons de le voir. Après trépanage, les trous subsistant dans le cordon sont rebouchés par soudage ou, de préférence (1) , mécaniquement.

9.7. Essais non destructifs. Radiographie. Gammagraphie. Ultrasons.

Parmi les essais non destructifs se sont surtout répandus ceux par *radiographie* et par *gammagraphie*, c'est-à-dire par examen et le plus souvent photographie à travers le cordon de soudure au moyen des rayons X (*fig.9.12*) ou des rayons γ émis par des substances radioactives.

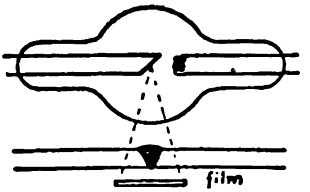


Fig.9.12
Schéma d'une ampoule à rayons X et de l'examen d'une soudure

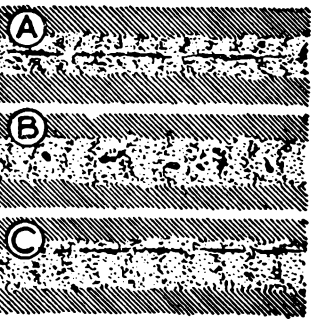


Fig.9.13

(1) Le bouchage de grands trous par soudage peut donner naissance à des tensions internes (voir § 8.1).

Ces méthodes de contrôle reposent sur le fait que tout manque de matière dans la section du cordon, ainsi que la présence de toute matière non métallique (oxydes, laitier), provoquent une plus grande transparence vis-à-vis de ces rayons et se traduisent sur le film photographique par une tache dont l'aspect et les dimensions correspondent à ceux du défaut.

A titre d'exemple, la *figure 9.13* représente (autant que peut le faire un dessin), l'aspect des radiogrammes (négatifs) correspondant : A) à un manque de traversé ; B) à des soufflures ; C) à un collage parallèle à la direction des rayons. Il est à remarquer qu'un collage non parallèle à cette direction est difficile ou même impossible à déceler.

La radiographie et la gammagraphie des soudures sont surtout appliquées jusqu'ici aux assemblages sur fortes épaisseurs. En général, ces modes de contrôle sont pleinement justifiés pour toute construction soudée dont la sécurité en service doit être absolument garantie (réservoirs et tuyauteries à pression, ponts, constructions navales, aéronautiques, spatiales, etc...).

Leur mise en application nécessite l'emploi d'un matériel d'un prix élevé qui exige certaines précautions en raison du danger du rayonnement, et l'intervention d'un personnel spécialement entraîné à l'interprétation des radiogrammes ou des gammagrammes. On peut remarquer à ce propos que de nombreux organismes de contrôle des matériaux sont aujourd'hui équipés, tant en personnel qu'en matériel, pour procéder au contrôle radio ou gammagraphique des soudures. Signalons que d'autres procédés de contrôle non destructif ont été expérimentés avec succès : la magnétoscopie et, plus récemment, l'emploi des ultra-sons.

Nous dirons quelques mots de ce dernier procédé, qui a pris ces dernières années une certaine extension.

Les ultra-sons (ou ultrasons) sont des vibrations de la même nature que le son, mais qui ne sont pas audibles c'est-à-dire perceptibles par l'oreille humaine. Leur fréquence (1) est supérieure à 20 000 Hz ou cycles par seconde (sons audibles : entre 20 et 20 000). Ils se propagent particulièrement bien dans les matières solides mais sont réfléchis, comme l'écho pour le son, par les obstacles tels que des cavités, des discontinuités, des matières non métalliques comme du laitier, des oxydes, etc... On les produit au moyen de dispositifs électroniques spéciaux et on les enregistre de même.

Le principe de la détection des défauts, notamment de soudage, dans les métaux, repose sur la comparaison entre les signaux ultrasonores émis sur une face de la pièce à contrôler et les signaux que cette pièce réfléchit. L'utilisation de machines automatiques dont un palpeur parcourt toute la longueur de la soudure permet d'obtenir une

(1) Notion comparable à la fréquence du courant électrique, voir § 2.4.

sorte d'image de celle-ci comparable à une radiographie. Contrairement à celui des rayonnements radio-actifs, l'emploi du procédé ne nécessite aucune précaution particulière.

9.8. Essais d'étanchéité

Ce sont également, sur un plan beaucoup moins élaboré des essais non destructifs. Ils peuvent se faire de différentes manières :

a) Pour des appareils ouverts ou pour des appareils fermés et de grandes dimensions, on procède par simple remplissage d'eau et examen des soudures du côté extérieur. Ce procédé ne révèle pas toujours de petites fissures pouvant être colmatées par de la rouille. Pour des appareils de grandes dimensions, il exige en outre un volume d'eau important ;

b) Pour des appareils fermés ou pouvant être fermés et dont les dimensions ne sont pas trop grandes (1), on opère par remplissage d'air sous *très faible pression* (1 bar), l'appareil étant complètement dans l'eau d'une cuve ou d'un bassin quelconque. Il ne faut surtout pas confondre cet essai avec celui de résistance à la pression, lequel doit toujours se faire par pression *hydraulique* (voir § 9.9). L'essai sous légère pression d'air nécessite déjà un matériel plus important que le simple essai par remplissage d'eau.

Les deux méthodes ainsi décrites présentent cependant encore un autre inconvénient : elles ne peuvent s'appliquer qu'à des pièces ou appareils complètement assemblés ; si ceux-ci sont de forme compliquée, s'ils comportent par exemple des cloisonnements, une double enveloppe, etc.., il sera très difficile sinon impossible de reprendre les soudures aux endroits reconnus défectueux et même parfois de reconnaître ces endroits. C'est pourquoi nous conseillons vivement la méthode ci-après, (ressuage) qui présente un intérêt très général et peut s'appliquer à des *éléments soudés*, de forme quelconque, pouvant être assemblés après l'épreuve d'étanchéité et la retouche éventuelle de chacun d'eux :

c) Après avoir nettoyé à la brosse métallique les deux faces de la soudure, on badigeonne le cordon du côté qui sera la face extérieure dans l'appareil terminé, au moyen d'un lait de chaux (de la chaux de carbure convient parfaitement) ; on laisse sécher ce revêtement, puis on badigeonne l'autre face du cordon au moyen de pétrole ou d'un autre agent pénétrant. Par la moindre fissure, ce dernier s'infiltre et vient former des taches dans la couche de chaux, ce qui permet de localiser les défauts d'étanchéité. Pour les réservoirs de stockage de pétrole, d'essence, etc.., cette méthode de contrôle, en évitant le remplissage d'eau, évite aussi la rouille qui en serait la conséquence.

---

(1) Pour des raisons de sécurité, ce mode opératoire ne peut être ordonné qu'après calcul par un ingénieur.

9.9. Essais à la pression hydraulique

Ces essais sont obligatoires pour tous les réservoirs et tuyauteries devant fonctionner sous pression. Ils consistent à remplir d'eau le récipient et à comprimer celle-ci au moyen d'une pompe appropriée, à une pression supérieure à la pression de service (généralement une fois et demie celle-ci). Il est recommandable de soumettre les soudures et leurs abords, pendant que l'appareil est sous pression hydraulique, à un martelage rapide et énergique au moyen d'un marteau léger.

CHAPITRE 10

PRIX DE REVIENT DU SOUDAGE

10.1. FACTEURS DU PRIX DE REVIENT

Le prix de revient d'un travail de soudage à l'arc est constitué par la somme des facteurs suivants :

a) Le coût des électrodes utilisées ;

b) La main-d'oeuvre
- b_1) de pointage,
- b_2) de soudage,
- b_3) de burinage ou gougeage éventuels ;

c) Les frais généraux ;

d) La consommation d'énergie électrique ;

e) Eventuellement, l'amortissement de l'installation nécessaire ainsi que ses frais d'entretien.

Nous ne traiterons ici que des postes a, b_1, b_2 et d.

En effet, le calcul des frais généraux n'a rien de particulier dans le cas du soudage à l'arc, et les coefficients appliqués diffèrent d'un atelier à l'autre et même d'un genre de fabrication à un autre. La détermination de ces coefficients sortirait du cadre de cet ouvrage.

La main-d'oeuvre nécessaire pour le burinage ou le gougeage éventuels des racines de soudure est également trop influencée par l'outillage dont on dispose. Il est d'ailleurs plus logique d'incorporer cette main-d'oeuvre, ainsi que les consommations de matières et d'énergie correspondantes, dans la *préparation* du soudage, problème de chaudronnerie ou d'usinage que nous n'avons pas à traiter ici, tout au moins sur le plan du prix de revient.

Enfin, quant à l'amortissement et à l'entretien des installations, il est rare qu'ils soient à calculer pour un travail déterminé. On les répartit généralement sur un ensemble important de travaux et ici, comme dans le cas des frais généraux, aucune indication ne peut être donnée qui présente un caractère général.

10.2. Consommation d'électrodes

D'une façon générale, la consommation d'électrodes par mètre courant de soudure est déterminée :

a) Par le poids de métal à déposer en fonction des dimensions du joint ;
b) Par la répartition de ce poids suivant celui des couches déposées par les électrodes de chacun des diamètres utilisés ;
c) Par le rendement des électrodes, c'est-à-dire le poids de métal qu'une électrode de diamètre donné est capable de déposer (voir p.119).

Le poids de métal à déposer constitue le facteur qui peut être calculé le plus facilement et avec la meilleure approximation, *à condition* toutefois que les préparations des joints soient conformes à des données précises. La consommation d'électrodes variera souvent dans une grande mesure si la préparation diffère,même de peu, de celle prévue, ou encore si, les pièces ayant joué au cours de l'accostage des bords ou du pointage, et notamment l'écartement ayant varié, les bords ne se présentent plus exactement ainsi qu'il a été prévu au plan.

Cette consommation variera également, toutefois dans une proportion *d'autant plus faible* que l'épaisseur est *plus forte*, si la surépaisseur du cordon diffère de celle qui a été prescrite. Prenons un exemple dans le cas du soudage bout à bout à plat, de tôles préparées en V à 60° sans reprise à l'envers :

Epaisseur 6,4 mm	Sans surépaiss.(*a*)	Avec surépaiss. normale (*b*)	*b* en % de *a*
Métal à déposer (g/m)	126	212	168 %
Epaisseur 25,4 mm	Sans surépaiss.(*a*)	Avec surépaiss. normale (*b*)	*b* en % de *a*
Métal à déposer (g/m)	2 860	3 320	116 %

Pour les tôles minces, c'est-à-dire jusqu'à 3 mm inclusivement, la consommation d'électrodes est considérablement influencée, non seulement par l'écartement, mais encore par le mode de manipulation des électrodes. C'est pourquoi, pour ces épaisseurs, il faudra se baser avec beaucoup de prudence sur les chiffres cités et procéder à des essais de repérage.

Poids de métal à déposer par mètre pour les soudures bout à bout

Pour les préparations conformes à celles indiquées au tableau 7, p. 64 , avec une surépaisseur normale, et en tenant compte de la re-

prise éventuelle sur racine burinée ou gougée, les poids de métal à déposer sont indiqués sur le tableau 13 ci-après.

En examinant ce tableau, on constate que les joints les plus économiques *en poids de métal à déposer* sont, pour ce qui concerne les joints repris à l'envers ou soudés sur les deux faces (électrodes des classes O,A,R,C et B) :

De 6 à 9 mm : en V avec reprise à l'envers ;
De 10 à 40 mm : en X ;
De 50 à 100 mm : en double U .

On constate aussi l'intérêt considérable des électrodes de la classe V .

Poids de métal à déposer par mètre pour les soudures d'angle

Ce calcul est beaucoup plus simple, car ce poids dépend seulement de la gorge *g* (§ 6.14) et du profil du cordon.

Le tableau 14 page 119 donne les valeurs moyennes de ces poids.

Ayant ainsi déterminé le poids de métal à déposer par mètre de cordon, il faut maintenant connaître le poids de métal effectivement déposé par une électrode.

Pour les différents diamètres d'électrodes et les longueurs normales citées au § 3.3, les poids théoriques des âmes sont indiqués au tableau 15 avec, en regard, les poids moyens pratiquement déposés en admettant un rendement global de 75 % , généralement admissible. Si, pour l'électrode considérée, ce rendement est différent de 75%, il suffit de multiplier les poids théoriques par le rendement réel (1).

(1) Rappelons que celui-ci peut dépasser 100% pour les électrodes à apport de métal par l'enrobage (classe V).

TABLEAU 13

Poids de métal à déposer (g/m) en soudage bout à bout, préparation suivant tableau 6

e (mm)	Soudure sur une face sans reprise	Soudure sur une face avec reprise		Soudure sur deux faces		
		V	U	I	X	Double U
1	I 15	–	–	–	–	–
2	I 50	–	–	–	–	–
3	I 80	–	–	–	–	–
4	I 140	–	–	260	–	–
5	175	–	–	330	–	–
6	200	310	–	400	–	–
7	240	400	–	480	–	–
8	380	515	–	570	–	–
9	V 500	625	–	–	650	–
10	V 630	760	–	–	730	–
12	870	1 140	1 400	–	900	–
15	1 230	1 500	1 840	–	1 150	–
20	2 140	2 400	2 560	–	1 620	–
25	3 230	3 500	3 440	–	2 340	3 200
30	–	–	4 300	–	3 130	3 900
35	–	–	5 300	–	4 000	4 600
40	–	–	6 400	–	5 000	5 400
50	–	–	9 000	–	7 300	7 150
60	–	–	–	–	10 000	9 050
80	–	–	–	–	17 000	13 400
100	–	–	–	–	25 700	18 800
Avec utilisation partielle ou totale d'électrodes classe V : (voir tableau 11, p. 82)						
6	–	–	–	280	–	–
8	–	–	–	340	–	–
10	–	–	–	460	–	–
12	–	–	–	570	–	–
15	–	–	–	750	–	–
20	–	1 360	–	–	–	–
25	–	2 260	–	–	–	–

TABLEAU 14

Poids de métal à déposer (g/m) pour les soudures d'angle en fonction de la gorge g (voir § 6.14)

g (mm)	Cordon convexe	Cordon plat	Cordon concave
3	66	70	87
4	123	130	160
5	190	200	250
6	265	280	350
7	360	380	470
8	470	500	620
9	600	630	790
10	740	780	970
11	890	940	1 170
12	1 060	1 120	1 400
15	1 650	1 750	2 200
20	2 950	3 120	3 900
25	4 650	4 900	6 100

TABLEAU 15

Poids de métal déposé par électrode
(classes O,A,R,C et B)

Diamètre (mm)	2,5	3,25	4	5	6,3	8
Longueur (mm)	350	450	450	450	450	450
Poids théorique (g)	13,4	29,1	44,1	68,9	110	176,3
Poids déposé (g)	10	22	33	52	83	132

Prenons maintenant un exemple :

Combien d'électrodes de 3,25 et 4 mm sont-elles utilisées par mètre de cordon d'angle, concave, de gorge g = 7 mm sur des tôles de 12 mm d'épaisseur ?

Le tableau 8 , p. , nous indique que la passe du fond, en 3,25, pèsera environ 150 g. Le tableau 14 indique comme poids total du cordon 470 g. Le poids à déposer en électrodes de 4 mm est donc 470 - 150 = 320 g. Il faut donc, suivant le tableau 15 :

$$\frac{150}{22} = 6{,}8 \text{ électrodes } 3{,}25 \text{ Ø}$$

et $$\frac{320}{33} = 9{,}7 \text{ électrodes } 4 \text{ Ø}$$

10.3. Main-d'oeuvre de pointage (1)

Il est difficile de citer des temps de pointage parce que ceux-ci diffèrent très fortement suivant le genre de construction et suivant les dispositions prises par l'atelier pour accoster et fixer les pièces en position de soudage.

D'une part, le nombre de points par mètre courant de soudure, d'autre part le poids de métal à déposer pour chaque point, varient en fonction de l'épaisseur des pièces à assembler, de la forme et de la raideur de ces pièces.

On peut cependant dire que pour les tôles d'épaisseur moyenne (4 à 15 mm) l'exécution d'un point demande de 0,3 à 0,6 minute.

10.4. Main-d'oeuvre de soudage

Lorsqu'on a déterminé (§ 10.2) le nombre d'électrodes de chaque diamètre à utiliser par mètre de cordon, il est assez facile de calculer le temps de fusion de ces électrodes si l'on connaît l'intensité de courant qui devra être choisie dans chaque cas.

Le graphique *figure 10.1* indique, pour les différentes classes d'électrodes et pour chacun des diamètres les plus courants, le temps de fusion à considérer (2).

Il s'agit bien entendu d'un temps "pur", toujours largement inférieur au temps total de soudage.

A titre d'exemple, calculons ce temps (par mètre) pour le cas examiné au § 10.2, en supposant que les électrodes utilisées soient de la classe A et que le travail nécessite :

Pour la passe de fond en 3,25 mm : 140 A ;

Pour les passes suivantes : 170 A.

La figure 10.1 donne respectivement :

Pour les 3,25 mm : 0,97 minute ;

Pour les 4 mm : 1,2 minute .

D'où :

---

(1) Dans le calcul ci-dessus, la consommation d'électrodes pour le pointage est comprise dans la consommation obtenue.

(2) Nous ne donnons pas d'indication pour les électrodes de la classe V . On se basera, pour ces électrodes, sur les catalogues du fabricant.

Temps pour les 3,25 mm : 0,97 × 6,8 = 6,6 minutes
Temps pour les 4 mm : 1,2 × 9,7 = 11,6 minutes
Total ..... 18,2 minutes

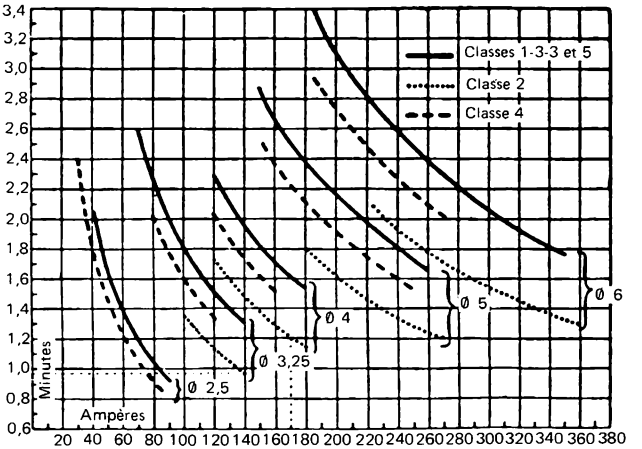


Fig.10.1 Classe 1=O ; Classe 2=A ; Classe 3=R ; Classe 4=C ; Classe 5=B.

Voyons maintenant comment le "temps de fusion" ainsi obtenu peut conduire à l'évaluation du temps de travail réel.

On appelle *facteur de marche* ou *coefficient d'utilisation* d'un poste de soudage le rapport entre le temps de fonctionnement effectif, arc allumé, ou temps d'*ustion* de l'arc, et le temps nécessaire à l'exécution du travail de soudage. Ce facteur s'exprime le plus souvent en % .

La différence entre le temps total et le temps d'ustion est constituée par les temps *morts*, qui comprennent principalement :

a) Les changements d'électrodes ;
b) Les coupures de l'arc en fin de cordon ou pour une cause accidentelle quelconque (allongement excessif de l'arc, défaut de soudage, etc...) ;
c) Le piquage du laitier ;
d) Les arrêts du soudage nécessités par les déplacements du soudeur ou des pièces à souder.

Toute autre chose égale, le facteur de marche est plus grand :

Avec de grosses électrodes qu'avec des électrodes minces ;
Pour des cordons longs que pour des cordons courts ;
Pour les cordons en une seule passe que pour ceux en plusieurs

passes ;
En soudage à plat, qu'en soudage en position difficile ;
A l'atelier, que sur le chantier.

Lorsque le poste de soudage débite à son réglage maximal, le facteur de marche ne peut en principe dépasser le maximum conventionnellement admis pour la réception du poste (1), c'est-à-dire 60%. Lorsque le poste fonctionne en dessous de son réglage maximal, cette valeur pourrait être dépassée. Toutefois, il est exceptionnel que le facteur de marche, calculé sur une période assez longue, de quelques heures par exemple, dépasse 60%, tout au moins en soudage manuel.

Voici les facteurs de marche sur lesquels on peut se baser pour les travaux courants :

	En atelier	*Sur chantier*
Montage charpentes, soudures courtes	30%	20%
Montage charpentes, soudures longues	35%	25%
Tôlerie, soudures courtes	27%	20%
Tôlerie, soudures longues	32%	25%
Chaudronnerie, soudures courtes	35%	25%
Chaudronnerie, soudures longues	40%	30%
Soudures tôles très épaisses	45 à 50%	35%
Travaux à la chaîne, avec positionneurs	50 à 60%	-
Travaux de rechargement	60 à 65%	50 à 55%

Dans l'exemple numérique examiné précédemment, et en supposant qu'il s'agisse de soudures longues en montage de charpentes et en atelier, on obtiendrait donc comme temps de travail, par mètre de soudage :

$$18{,}2 \times \frac{100}{35} = 52 \text{ minutes}$$

Remarquons que les facteurs de marche cités plus haut, non seulement peuvent servir dans la prévision des temps de travail, mais encore constituent des valeurs normales qu'une bonne organisation doit permettre d'atteindre. On pourra donc aisément se rendre compte du degré d'organisation des travaux de soudage en comparant le facteur de marche, déterminé expérimentalement par chronométrage, avec les facteurs de marche que nous indiquons.

(1) Norme AFNOR A 85-011, voir renvoi 2, p. 73

10.5. Energie électrique

On lit encore assez fréquemment des exposés relatifs au prix de revient du soudage à l'arc et dans lesquels la consommation d'énergie électrique est indiquée "pour mémoire" comme si ce facteur pouvait être négligé.

S'il est moins important que les autres facteurs, - ce que nous ne contestons pas, - il n'est cependant pas négligeable. C'est pourquoi il est utile de le calculer avec la meilleure précision possible.

Pour ce faire, le plus simple est de relier la consommation d'énergie électrique au nombre d'électrodes à fondre, calculé comme nous l'avons expliqué au § 10.2.

Le nombre de kWh (kilowatts-heures) consommés *dans l'arc* par électrode est donné par le tableau 16, suivant la classe de l'électrode.

TABLEAU 16

Nombre de kWh consommés dans l'arc par l'électrode

Diamètre (mm)	2,5	3,25	4	5	6,3
Cl. O,R et B	0,040	0,090	0,135	0,215	0,340
Classe C	0,036	0,080	0,120	0,190	0,300
Classe A	0,030	0,068	0,105	0,160	0,260

Connaissant le nombre d'électrodes de chaque diamètre à utiliser par mètre courant de soudure, on obtiendra aisément la consommation dans l'arc.

Exemple (voir § 10.2) :

6,8 électrodes de 3,25 , classe A : 0,068 × 6,8 = 0,462 kWh
9,7 électrodes de 4 , classe A : 0,105 × 9,7 = 1,018 kWh
Total ..... 1,480 kWh

Il faut maintenant ajouter, au chiffre ainsi obtenu, les *pertes d'énergie* dans les câbles de soudage.

Elles sont données par le graphique *figure 10.2* qui, pour la facilité du calcul ultérieur, les exprime en *watts-heures par minute de temps de fusion*, en fonction de l'intensité du courant de soudage, de la section du câble utilisé (voir § 2.3) et par mètre courant de longueur totale L de câbles au secondaire (1).

(1) Les pertes d'énergie dans les câbles du primaire sont minimes et peuvent être négligées.

Toujours en reprenant le même exemple numérique, on trouverait donc comme perte d'énergie dans les câbles de soudage, si ceux-ci avaient 40 mètres de longueur totale et une section de 50 mm² :

Ø	Temps de fus.	I	L	Perte d'énergie
3,25	*6,6 mm*	*140*	*40*	*0,12 × 40 × 6,6 = 31,7 Wh*
4	*11,6 mm*	*170*	*40*	*0,17 × 40 ×11,6 = 79 Wh*
				Total ....110,7 Wh

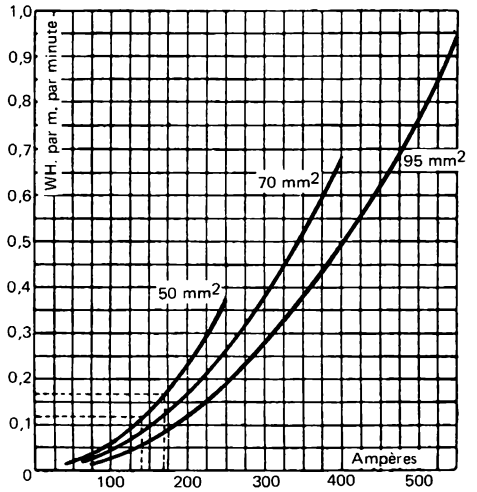


Fig.10.2

soit environ 0,11 kWh.

Ajoutant cette perte d'énergie à l'énergie utilisée dans l'arc, on trouve :

1,48 + 0,11 = 1,59 kWh.

qui est l'énergie totale absorbée au secondaire.

La consommation d'énergie au secondaire n'est cependant pas celle qui intéresse l'utilisateur.Ce qui compte pour lui, c'est la consommation *au primaire*, c'est-à-dire celle qui est enregistrée par le *compteur* d'électricité et qui sera payée au fournisseur de courant.

L'énergie consommée au primaire est la somme de deux facteurs :

a) La consommation de l'énergie transformée par le poste de soudage et fournie au secondaire. Elle s'obtient en *divisant* la consommation totale absorbée au secondaire (énergie dans l'arc + pertes dans les câbles) par le *rendement* du poste de soudage.

On peut admettre comme rendement moyen, à défaut d'un chiffre garanti par le constructeur :

Postes rotatifs triphasés-continus	0,4
Postes rotatifs convertisseurs de fréquence ...	0,5
Redresseurs triphasés-continus	0,5
Transfos trimonophasés	0,65
Transfos mono-monophasés	0,8
Idem pour électrodes 2,5 Ø et moins	0,75

Dans l'exemple précédent, la consommation d'énergie transformée au primaire serait, dans le cas de l'emploi d'un transfo mono-monophasé :

$$\frac{1.59}{0,8} = 1,99 \text{ kWh.}$$

b) Les pertes à *vide*, c'est-à-dire la consommation au primaire lorsque l'arc n'est pas allumé. Ces pertes sont très variables suivant le modèle et la puissance du poste utilisé. La perte de puissance se situe entre 0,1 et 0,5 kW pour la plupart des postes statiques, mais elle peut atteindre et même dépasser 1 kW pour les postes rotatifs. Elle est indépendante du réglage du poste puisqu'elle se mesure circuit secondaire coupé. Lorsque cette perte est indiquée par le constructeur ou lorsqu'on l'a mesurée une fois pour toutes, elle peut être introduite dans le calcul de la manière suivante :

La durée totale du travail de soudage, moins la durée d'ustion de l'arc (voir § 10.4) donne la durée de la marche à vide. On multiplie la perte de puissance par cette dernière durée *exprimée en heures*. On obtient la perte d'énergie à vide, que l'on ajoute à la consommation d'énergie transformée au primaire.

Dans l'exemple précédent (voir § 10.2), la durée de la marche à vide, toujours considérée par mètre de cordon, est de

$$52 - 18,2 = 33,8 \text{ minutes.}$$

Supposons que les pertes à vide soient de 0,4 kW (puissance) c'est-à-dire de 0,4 kWh (énergie) par heure ou par 60 minutes. On aura donc comme perte d'énergie à vide

$$0,4 \times \frac{33,8}{60} = 0,225 \text{ kWh.}$$

Nous l'ajoutons aux 1,99 kWh trouvés précédemment, ce qui donne

$$1,99 + 0,225 = 2,215 \text{ kWh.}$$

En résumé, le prix de revient du mètre de soudure dans l'exemple étudié jusqu'ici se calculera sur les bases suivantes :

Electrodes : 6,8 de 3,25 Ø et 9,7 de 4 Ø .
Main-d'oeuvre de soudage (sans pointage) : 52 minutes.
Energie électrique : 2,215 kWh.

TROISIÈME PARTIE

TECHNIQUE DU SOUDAGE A L'ÉLECTRODE MÉTALLIQUE DES MÉTAUX AUTRES QUE LES ACIERS ORDINAIRES

CHAPITRE 11

AUTRES ACIERS

11.1. Les différentes catégories d'aciers

a) Aciers non alliés

Les aciers non alliés ou "au carbone" sont des alliages de fer et de carbone (maximum 1,6% de carbone) avec de minimes quantités de *silicium* (max. 1%) , de *manganèse* (max. 1,2%) et des proportions encore plus faibles de soufre et de phosphore ; ces deux derniers éléments, qui nuisent en général (1) à la qualité de l'acier, constituent ses principales impuretés.

Le tableau 17 ci-après donne une classification générale simplifiée des aciers au carbone (2):

TABLEAU 17 - *Aciers au carbone*

Nuance de l'acier	Carbone %	R à la traction à l'état recuit (N/mm^2) *
Extra-doux	Moins de 0,15	350-450
Doux	0,15 - 0,20	400-500
Mi-doux	0,20 - 0,30	500-600
Mi-dur	0,30 - 0,40	600-700
Dur	0,40 - 0,50	700-800
Très-Dur	0,50 - 0,60	800-900
Extra-Dur	Plus de 0,60	Plus de 900

(1) Actuellement, on produit cependant des aciers au soufre destinés aux pièces à usiner par décolletage.

(2) D'après PELOU, les Aciers de fabrication française. La classification actuellement adoptée en France est considérablement plus complexe et plus détaillée. Voir AFNOR A 02-025 de décembre 1973.

On range encore dans la catégorie des aciers "non alliés" ceux qui contiennent des quantités *minimes* d'autres éléments (nickel, chrome, molybdène, cuivre, vanadium, etc..), la proportion maximale de chacun de ces éléments variant suivant leur nature entre 0,05 et 0,25%.

b) Aciers effervescents et aciers calmés

Indépendamment de la teneur en carbone, les aciers se trouvant, au moment de leur élaboration, à l'état liquide, dissolvent certaines quantités d'oxygène. Lors de la solidification, ce gaz se dégage en formant de nombreuses petites soufflures qui restent emprisonnées dans la masse. La plupart des aciers de qualité courante se trouvent dans ce cas et donnent lieu, lorsqu'on les refond notamment par soudage, à un certain bouillonnement ; on les appelle aciers *effervescents*. Pour améliorer leurs qualités, on leur ajoute, lors de l'élaboration, des matières réductrices à base d'aluminium, de silicium, de manganèse, de titane, etc.. qui fixent l'oxygène dissous et éliminent les soufflures. De tels aciers sont dits *calmés*.

c) Aciers alliés

Ils contiennent, en plus du fer et du carbone, un ou plusieurs éléments dont la teneur est supérieure aux limites ci-dessus.

Lorsque cette teneur n'atteint 5% pour aucun des éléments d'addition, l'acier est dit *faiblement allié*.

Les aciers alliés comportent un grand nombre de catégories. Parmi celles-ci, les suivantes présentent des caractères intéressants à signaler en ce qui concerne leur soudage à l'arc :

Les aciers semi-inoxydables ;
Les aciers inoxydables au chrome ;
Les aciers inoxydables au chrome-nickel ;
Les aciers à 12-14% de manganèse.

Nous en parlerons aux §§ 11.3 à 11.6.

11.2. Aciers au carbone

Pour les aciers au carbone dont la résistance à la traction à l'état recuit va jusqu'à 650 N/mm^2 , c'est-à-dire pour les aciers extra-doux, doux et mi-doux (et en partie les aciers mi-durs), toutes les indications que nous avons données jusqu'ici sont valables. On se reportera donc :

Pour le choix de l'électrode, au § 3.5.
Pour la technique du soudage, à l'ensemble de la deuxième partie de cet ouvrage.

Les aciers au carbone plus résistants sont rarement soudés, sauf les rails (aciers durs). Certains fabricants produisent des électrodes qui déposent un acier faiblement allié, mais qui conviennent pour cet usage. Leur résistance atteint 700 à 800 N/mm^2. Elles sont d'ailleurs surtout utilisées pour les rechargements anti-usure (v. chapitre 12).

La sensibilité à la trempe des aciers au carbone augmentant avec leur teneur en cet élément, il faudra donc combattre les effets de trempe d'autant plus que l'acier est plus carburé. Le moyen le plus simple et le plus couramment utilisé dans ce but consiste en un *préchauffage, par exemple, au chalumeau oxyacétylénique*. Ce préchauffage s'effectue aux températures suivantes, qui peuvent être contrôlées au moyen de crayons thermo-indicateurs (§ 3.8).

Carbone %	Pièces moyennes	Pièces épaisses
0,3	80°C	120°C
0,4	110°C	150°C
0,5	200°C	300°C
0,6	330°C	380°C

11.3. Aciers semi-inoxydables

Ce sont des aciers faiblement carburés et qui contiennent une petite quantité de cuivre (de l'ordre de 0,5%) avec parfois de minimes additions de chrome, de nickel, de molybdène. Ils résistent mieux à la corrosion atmosphérique que les aciers au carbone, mais ne résistent pas à l'action des réactifs chimiques.

Leur soudage ne présente rien de particulier, si ce n'est que l'âme des électrodes à utiliser doit être de même composition que le métal de base si l'on veut obtenir une résistance uniforme à la corrosion.

11.4. Aciers inoxydables au chrome

On en emploie deux catégories :

a) Ceux à moins de 12% de chrome, qui se rencontrent surtout en coutellerie, instruments de chirurgie, etc.. On les soude très rarement car pour être soudables ils doivent être très peu carburés, ce qui n'est généralement pas le cas. Certains fabricants fournissent des électrodes spéciales pour le soudage de ces aciers. Il est recommandé de préchauffer le métal de base à environ 300°C, et indispensable de faire subir aux assemblages soudés une trempe à l'eau suivie d'un revenu * à 600°C.

b) Ceux à plus de 12% de chrome et particulièrement ceux à environ 15% et ceux à environ 25% de chrome.Les premiers sont utilisés dans la fabrication de l'appareillage pour industrie chimique et pour usage culinaire ainsi qu'en orfèvrerie et en décoration. Les seconds, intéressants par leur forte résistance à chaud, sont mis à profit pour la construction de barreaux de grilles, brûleurs, caisses à cémentation, soupapes. La soudabilité de tous ces aciers, surtout celle des seconds, est généralement mauvaise à cause du fort grossissement du grain qui se produit lorsqu'on les chauffe.

Les caractéristiques d'emploi des électrodes pour aciers inoxydables au chrome sont les mêmes que celles des électrodes pour aciers inoxydables au chrome-nickel (§ suivant).

11.5. Aciers inoxydables au chrome-nickel (austénitiques) (1)

C'est parmi ces derniers que se situe la nuance la plus répandue : l'acier à 18% de chrome et 10% de nickel dit *"acier 18-8"* (AFNOR Z 12 CN 18-10 ou AISI 302) (2).

On le reconnait par sa surface brillante et le fait qu'il est non-magnétique, c'est-à-dire non-attirable à l'aimant.

Les propriétés de cet alliage sont très différentes de celles des aciers au carbone. En particulier :

a) Il est aussi résistant que l'acier dur, mais plus ductile et plus malléable * que l'acier au carbone extra-doux ;

b) Sa dilatation jusqu'à température de fusion est une fois et demie plus élevée que celle des aciers au carbone ;

c) Sa conductibilité calorifique est près de *quatre fois plus faible* ;

d) Sa conductibilité électrique est *sept fois plus faible* ;

e) Sa résistance à la corrosion est obtenue par une *trempe* * à 1 100° C . Ce traitement ne durcit pas l'acier 18-8, mais au contraire *l'adoucit* ;

f) Lorsque l'acier 18-8 est de nouveau réchauffé à une température comprise entre 250 et 750°C et refroidi relativement lentement, il subit une grave altération ; un constituant contenant le carbone se dépose entre les cristaux de l'alliage, qui devient alors sujet à la corrosion dite "intergranulaire".

---

*(1) Dans les aciers à l'état liquide, le carbone se trouve dissous dans le fer. On appelle "austénitique" la structure * obtenue lorsque, par suite de la composition de l'acier ou de ses conditions de refroidissement, le carbone ne se sépare pas mais reste à l'état dissous dans le fer solidifié.*

(2) Norme de l'American Iron and Steel Institute.

Un échantillon d'acier 18-8, brut de soudage, soumis à l'action d'un acide, se corrodera donc de part et d'autre du cordon dans les zones qui auront été chauffées dans cet intervalle de température.

Cet inconvénient a pu être combattu :

1°) par l'utilisation d'aciers inoxydables aussi peu carburés que possible (mais dont la résistance mécanique est alors plus faible);

2°) par un traitement de *régénération* consistant en une trempe à l'eau à 1 100°C imposée à l'ensemble de la pièce soudée ;

3°) surtout, à l'heure actuelle, par l'emploi d'aciers 18-8 contenant de petites quantités d'éléments tels que le molybdène, le titane, le niobium qui s'opposent à l'altération décrite ci-dessus ainsi qu'au grossissement du grain. De tels aciers dont le plus répandu répond à la norme AFNOR Z 8 CND 18-12 (AISI 316), sont alors *soudables* sans traitement de régénération après assemblage. Ils sont dits "stabilisés".

Préparation des bords

Si l'on utilise des électrodes classiques (v. plus loin), cette préparation est sensiblement la même que pour les aciers ordinaires, voir tableau 6 page 63 . Toutefois, le chanfrein en X est déjà utilisé à partir de 12 à 15 mm d'épaisseur.

Les bords doivent être parfaitement propres et notamment exempts de matières grasses pouvant occasionner un dépôt de carbone.

Nous reparlerons plus loin de la préparation des bords dans le cas de l'emploi des électrodes à haut rendement.

A cause de la forte dilatation de l'alliage, il faut procéder à un pointage serré ou bien utiliser des clames placées à faible écartement.

Electrodes

a) Electrodes classiques : Les électrodes classiques pour le soudage du 18-8 sont constituées par une baguette du même alliage, souvent additionnée de molybdène ou de niobium. Actuellement leur enrobage est le plus souvent du type rutile (voir p. 46).

La longueur de ces électrodes classiques est généralement plus faible que celle des électrodes pour aciers non alliés (voir plus loin). En effet, par suite de leur faible conductivité électrique, ces électrodes s'échauffent très fortement ; si elles étaient d'une longueur normale elles seraient portées rapidement au rouge ce qui provoquerait la chute de l'enrobage et par suite les rendrait inutilisables.

La majorité des électrodes en 18-8 ne s'emploient qu'en *courant continu* et raccordées au pôle + . Quelques-unes peuvent fonctionner en courant alternatif, à condition que la tension à vide de l'appareil de

soudage soit supérieure à 80 V. Dans ce cas, l'emploi d'un pilote à haute fréquence est recommandé (§ 2.8 et fig. 2.19).

b) Electrodes dites à haut rendement : Ces électrodes, d'un emploi plus récent, consistent en une âme en acier très doux de haute qualité et un enrobage contenant la totalité des éléments d'alliage, - chrome et nickel notamment, - qui s'incorporent au bain de fusion dans la proportion voulue pour former un alliage de composition comparable à celle de l'acier inoxydable de base.

Parmi leurs avantages, il faut citer le fait que leur âme étant en acier doux de bonne conductibilité électrique et thermique, elles peuvent, même en longueurs normales, supporter sans s'échauffer exagérément un courant d'intensité plus élevée que celui admissible pour les électrodes classiques correspondantes. De ce fait, une électrode à haut rendement d'un diamètre nominal (diamètre de l'âme) donné dépose autant de métal qu'une électrode classique de diamètre nominal immédiatement supérieur.

La rapidité du soudage ainsi que la pénétration obtenue sont remarquables, ce qui s'explique par les raisons déjà exposées à propos des électrodes par apport de métal par l'enrobage, pour aciers non alliés (classe V, page 48). C'est pourquoi l'on peut utiliser des préparations relevant de l'emploi des électrodes de cette classe (valeurs entre parenthèses reprises au tableau 7 page 64).

Courant de soudage

Les limites admises sont indiquées pour les deux types d'électrodes cités, au tableau 18 suivant :

TABLEAU 18

Type	Ø mm	longueur mm	Limites de courant (A)
classique	1,6	250	45 à 50
	2	300	55 à 60
	2,5	300	env.70
	3,25	350	env.90
	4	350	env.120
haut rendement	1,6	300	40 à 60
	2	350	50 à 80
	2,5	350	60 à 100
	3,25	350	90 à 150
		450	
	4	450	120 à 210

Les différents aciers inoxydables austénitiques : La liste suivante mentionne les principaux aciers inoxydables austénitiques français et indique la correspondance entre les normes françaises et les normes

américaines AISI souvent utilisées en Europe. Les deux premiers aciers de la liste sont ceux dont nous avons parlé précédemment. Les autres se soudent au moyen d'électrodes de composition très voisine et leur soudage donne lieu aux mêmes remarques que celui du 18-8 classique.(1).

AFNOR	AISI
Z 12 CN 18-10	302
Z 8 CND 18-12	316 (stabilisé)
Z 6 CN 18-09	304
Z 20 CNS 25-12	309
Z 15 CNS 25-20	310
Z 8 CNDT 18-12	316 Ti(stabilisé)
Z 8 CNDNb 18-12	318 (")
Z 6 CNT 18-11	321 (")
Z 6 CNNb 18-11	347 (")

11.6. Aciers austénitiques au manganèse (aciers Hadfield)

Ces aciers, qui contiennent 12 à 14% de manganèse, sont utilisés essentiellement pour les pièces devant résister à l'usure, telles que les appareils de voie, les organes de broyeurs et de concasseurs, les bagues d'usure, les tôles perforées pour trieurs, etc...

Leur coefficient de dilatation est encore plus élevé que celui des aciers inoxydables 18/8 car il atteint deux fois celui des aciers au carbone.

Leur conductibilité calorifique est trois fois plus faible que celle des aciers ordinaires.

Ils sont également non-magnétiques.

La soudure de ces aciers présente toujours une zone fragile de part et d'autre du joint. Aussi fait-on rarement des soudures d'assemblage de ces aciers. Par contre, sous forme d'électrodes, des aciers à 12-14% et analogues ont été utilisés pour les rechargements anti-usure (§ 12.2).

(1) Le soudage sous protection gazeuse (voir chap. 16) est aujourd'hui très largement utilisé pour l'assemblage des aciers inoxydables, surtout en tôles minces.

CHAPITRE 12

RECHARGEMENTS ANTI-USURE (1)

12.1. PARTICULARITÉS DES RECHARGEMENTS ANTI-USURE À L'ARC

Nous avons parlé au paragraphe 6.22 des rechargements ordinaires sur acier doux.

On appelle rechargements "anti-usure" ceux qui ont pour but non pas simplement de reconstituer une pièce usée, mais *d'augmenter* la résistance de la pièce vis-à-vis de l'usure. Le métal déposé est alors *différent* du métal de base : il est plus dur et plus résistant.

Ces rechargements s'effectuent :

a) Soit sur *pièce neuve*, établie aux dimensions voulues pour qu'après rechargement et usinage les dimensions exigées pour la pièce soient obtenues (rechargements préventifs) ;

b) Soit sur *pièce usée*, mais que l'on désire précisément remettre en service après l'avoir revêtue d'un métal mieux à même de résister à l'usure ultérieure (rechargements de réparation).

L'intérêt des rechargements anti-usure s'explique aisément. A l'heure actuelle, le constructeur dispose d'un choix abondant de métaux et d'alliages spéciaux capables de constituer des pièces de toute espèce destinées à travailler dans des conditions très sévères, mais ces matériaux sont de plus en plus coûteux, souvent d'une élaboration et d'un forgeage difficiles et enfin, en général, insuffisamment ductiles pour pouvoir constituer entièrement les pièces dont il s'agit. Par conséquent, en limitant leur emploi aux *endroits spécialement sujets à usure*, c'est-à-dire en rechargeant localement, au moyen de ces alliages spéciaux, des aciers ordinaires bon marché et ductiles, on aboutit à une solution beaucoup plus économique et plus rationnelle, en même temps qu'on réduit les temps d'arrêt nécessités par le remplacement de la pièce usée.

---

(1) Nous croyons utile de citer comme source de documentation détaillée sur ces rechargements une remarquable étude de G. MEYUS et J. LEFEBVRE publiée dans la Revue (belge) de la Soudure en 1964.

Signalons que dans de nombreux cas, les rechargements anti-usure exécutés à l'arc sont de qualité inférieure à ceux exécutés au chalumeau, pour les raisons suivantes :

a) Un mélange du métal de base et du métal déposé se produit dans une plus grande mesure que dans les rechargements au chalumeau, de sorte que le métal déposé n'a pas une composition régulière, surtout s'il n'y en a qu'une couche.

b) Dans le cas de rechargements de faible surface (pointes de dents de scie par exemple), le soudeur au chalumeau reste beaucoup mieux maître de son dépôt que le soudeur à l'arc.

c) Il est impossible de forger et par conséquent de former à chaud le rechargement fait à l'arc, car celui-ci se refroidit trop rapidement.

d) Pour certains aciers de base, notamment ceux contenant plus de 0,3% de carbone, le refroidissement trop rapide favorise les fissures. Il faut alors recourir au préchauffage au chalumeau.

e) La surface des rechargements est plus grossière et nécessite un parachèvement plus important. Néanmoins, les rechargements s'exécutent toujours à l'arc lorsque les pièces à recharger sont massives, que la quantité de métal à déposer est importante et que la surface rechargée peut rester brute (1).

12.2. ELECTRODES POUR LE RECHARGEMENT ANTI-USURE DE L'ACIER

On classe fréquemment les électrodes pour cette application suivant la dureté (Brinell, Rockwell ou Vickers pour les grandes duretés) du métal qu'elles déposent.

Il faut cependant bien considérer que la dureté ne donne qu'une indication *très relative* de la résistance à l'usure. Un métal déposé plus dur qu'un autre peut parfaitement se révéler moins résistant à l'usure dans les conditions où celle-ci a lieu. Ceci résulte de la complexité du phénomène d'usure, qui participe de l'un ou de plusieurs des cas suivants : roulement, glissement, abrasion, chocs répétés, érosion, corrosion, cavitation * , etc... Au surplus, l'usure peut avoir lieu à froid ou à chaud, le mouvement qui lui donne naissance peut être lubrifié ou non.

Enfin, dans le cas très fréquent de l'usure par abrasion, la nature de la matière abrasive (sa dureté, sa fragilité, la grosseur et la forme de ses grains) influence dans une grande mesure le comportement du dépôt et par suite le choix de la catégorie d'électrode.

Par conséquent, sauf s'il s'agit d'un cas classique où une électrode a fait ses preuves, c'est l'essai en service de la pièce rechargée, et cet essai seulement, qui permet de conclure qu'une électrode convient pour une application déterminée.

---

(1) Le soudage au plasma (chap. 18) se développe de plus en plus pour les travaux de rechargement.

Suivant la *nature* du métal qu'elles déposent, les électrodes de rechargement peuvent être classées en plusieurs catégories :

a) Electrodes déposant un acier faiblement allié (1)

Ces électrodes, dont les compositions sont assez nombreuses, déposent de l'acier au manganèse, ou au chrome, ou au manganèse-silicium, ou au chrome-manganèse, ou au chrome-molybdène, ou au chrome-nickel-molybdène, ou enfin au chrome-manganèse-molybdène.

Le métal déposé peut être peu carburé. Dans ce cas la dureté atteinte sur rechargement brut varie suivant les compositions entre 220 et 360 Brinell.

Il peut être moyennement carburé ; sa dureté peut alors être augmentée par trempe à l'eau suivie ou non de revenu, jusqu'à atteindre 400 à 600 Brinell.

Il peut enfin être fortement carburé et autotrempant. Sa dureté maximale, 500 à 600 Brinell, est alors atteinte par refroidissement naturel à l'air. La résistance aux chocs est assez faible.

Ces électrodes sont le plus souvent à enrobage basique et s'utilisent en courant continu, raccordées au pôle + , ou bien en courant alternatif à condition que la tension d'amorçage dépasse 70 V.

Le rechargement s'effectue habituellement à plat. Certaines électrodes permettent de l'exécuter en soudage vertical montant.

Les intensités à utiliser sont les mêmes que pour les électrodes basiques pour assemblage (tableau 5, page 43). Pour les électrodes déposant un métal autotrempant, elles sont de 20% plus faibles.

b) Electrodes déposant un acier fortement allié autre que de l'acier à 12-14% de manganèse

Suivant leur composition, ces électrodes déposent de l'acier au chrome (6 à 13%) ou au chrome-silicium, ou au nickel-chrome, ou au chrome-manganèse, ou enfin de l'*acier rapide* * .

Tous ces aciers sont assez carburés et autotrempants. La dureté obtenue varie suivant la composition entre 400 et 600 Brinell. Pour les aciers rapides, la dureté peut être augmentée par un revenu à 500-550°C, elle atteint alors 650 à 725 Brinell.

Ces électrodes sont le plus souvent à enrobage basique. Elles sont utilisées en courant continu raccordées au pôle + , ou bien en alternatif si la tension d'amorçage dépasse 70 V.

Le rechargement s'effectue toujours à plat.

(1) Voir § 11.1 la définition de cet acier.

Pour les intensités, très variables suivant la composition, on se référera aux indications des fabricants.

c) Electrodes déposant de l'acier à 12-14% de manganèse

Nous avons déjà parlé de cet acier au § 11.6 et signalé son coefficient de dilatation très élevé.

En raison de celui-ci, il est nécessaire, lorsqu'on recharge de l'acier au carbone avec de l'acier à 12-14% de manganèse, de procéder par passes très courtes et de marteler chacune d'elles afin de compenser le retrait.

Ce martelage a d'ailleurs un autre but, qui est d'augmenter par écrouissage la dureté du dépôt. Celle-ci, qui est de 180-200 Brinell à l'état brut, passe alors à 450 à 750 selon que l'acier déposé est à teneur moyenne en carbone (0,6%) ou à teneur élevée (1,2%).

Les électrodes à 12-14% de manganèse sont en général à enrobage basique. Elles s'utilisent en courant continu (pôle +) ou en alternatif si la tension d'amorçage dépasse 70 V.

Le rechargement s'effectue toujours à plat. Les intensités à appliquer sont un peu plus faibles (pour les gros diamètres : notablement plus faibles) que pour les électrodes d'assemblage à enrobage basique.

Pour améliorer la liaison de l'acier au manganèse avec l'acier doux, il est recommandable, lorsqu'on recharge ce dernier, de déposer les premières couches avec une électrode forgeable pour acier doux.

Les électrodes à 12-14% de manganèse, dont l'emploi est plutôt en régression, s'utilisent encore pour le rechargement de broyeurs giratoires, de concasseurs pour matière dures, de coeurs de croisements de voie et des pointes d'aiguillages.

d) Electrodes déposant des alliages (1)

On en distingue quatre types :

— Les alliages ferreux contenant plus de 20% d'éléments nobles (chrome, nickel), tels que les fontes fortement alliées , parmi lesquelles nous citerons les fontes au chrome (4% de C et 35% de Cr) très utilisées ; ils conviennent pour de gros travaux de rechargement anti-abrasion, mais leur tenue vis-à-vis des chocs est généralement faible.

(1) Pour plus de détails, le lecteur pourra se référer à l'article de H. REY, Chef de service à Ugine-Carbone, dans la revue Mécanique-Electricité de juin-juillet 1969. Cet article traite des alliages de rechargement dur.

- Les alliages à base de cobalt, les plus connus étant les *stellites*, mélanges de carbures de chrome, cobalt et tungstène. Ils sont d'un coût très élevé, mais remarquablement résistants à l'abrasion à chaud, à la corrosion, à l'attaque par les acides à froid. Pour les rechargements de faible volume, on préfère d'ailleurs habituellement utiliser le chalumeau oxyacétylénique, qui permet d'obtenir des dépôts plus lisses et plus homogènes, ou encore le rechargement à l'aide d'un pistolet de métallisation spécial alimenté au moyen de poudres métalliques permettant d'obtenir des dépôts de grande dureté.

- Les alliages à base de nickel, très intéressants pour les pièces devant résister à la corrosion à chaud à condition que l'atmosphère ne soit pas chargée en composés sulfurés, lesquels agissent très défavorablement sur le nickel.

- Les alliages à base de carbure de tungstène, exceptionnellement résistants à l'abrasion.

Ces différents alliages peuvent être déposés en courant continu (électrode pôle +), ou bien en courant alternatif, à condition que la tension d'amorçage soit assez élevée (70 à 90V). Ils sont aussi utilisés sous forme de poudre granulée et leur dépôt par soudage au plasma a été expérimenté avec succès (voir chapitre 18). Enfin, ils peuvent être aussi déposés par soudage TIG sous argon, procédé que nous décrirons au chapitre 17 .

e) Emploi de fils fourrés

Nous mentionnerons spécialement cette catégorie d'électrodes, très utilisées pour le rechargement anti-usure, et qui sont analogues à celles dont nous avons parlé à la fin du § 3.5. En fait, elles ne s'utilisent pas en soudage manuel, mais bien en soudage automatique ou semi-automatique. Elles se présentent d'ailleurs non plus en baguettes séparées, mais bien sous la forme d'un fil continu enroulé sur une bobine d'alimentation.

L'emploi des fils fourrés a pour origine la difficulté rencontrée, lorsqu'on cherche à conduire mécaniquement la descente, dans un bain de fusion, d'une électrode normalement enrobée, pour assurer le passage du courant depuis le dispositif de guidage (remplaçant la pince porte-électrode utilisée en soudage manuel) jusqu'à l'âme de l'électrode. On a surmonté cette difficulté en disposant le flux non plus à l'extérieur de l'âme, comme un enrobage, mais bien *à l'intérieur*, d'où le nom de fil fourré.

Pour la facilité de fabrication de ces fils, on adopte par exemple la solution qui consiste à enfermer le flux à l'intérieur d'un tube formé par un feuillard d'acier plusieurs fois replié sur lui-même (*fig.12.1*),de façon à obtenir une surface cyclindrique.

Fig.12.1

Une gamme très variée de fils de cette catégorie permet l'exécution très rapide et économique de rechargements anti-usure de presque toutes les compositions décrites dans le présent chapitre, de a à d . Cette technique s'emploie surtout pour le traitement de grandes surfaces.

L'emploi de ces fils fourrés se combine dans certains cas avec une protection gazeuse par CO2 (voir § 17.16).

12.3. PARACHÈVEMENT DES SURFACES RECHARGÉES

L'usinabilité des dépôts obtenus par rechargement à l'arc dépend surtout de la dureté du métal déposé. Cependant, la nature du métal de base peut avoir une influence importante, surtout pour les rechargements minces, à cause du mélange métal de base - métal déposé (1).

On peut parachever comme suit, selon la dureté réelle du dépôt :

Jusqu'à 250 Brinell : à l'outil en acier fondu.
De 250 à 350 Brinell : à l'outil en acier rapide.
De 350 à 500 Brinell : à la pastille en carbure de tungstène (Widia, etc..).
Au-delà de 500 Brinell : à la meule.

(1) En particulier, des zones de très grande dureté sont observées lorsqu'on recharge des pièces ayant été cémentées, même si ces pièces ont été recuites avant rechargement.

CHAPITRE 13

SOUDAGE DES FONTES ET DES MÉTAUX NON-FERREUX

13.1. Fontes

Les fontes sont des alliages de fer et de carbone contenant en général de 3 à 4% de carbone. Elles sont donc beaucoup plus carburées que les aciers. Elles contiennent en outre des proportions variables de silicium, souvent assez importantes, de manganèse, phosphore, soufre et parfois (fontes alliées) certains des éléments qui entrent également dans la composition des aciers alliés.

Elles sont beaucoup plus fusibles que les aciers : leur température de fusion se situe habituellement entre 1 050 et 1 230°C.

Lorsqu'une fonte a été, après coulée, refroidie très lentement, ou lorsqu'elle contient un pourcentage élevé de *silicium*, le carbone qu'elle contient se trouve en grande partie à l'état libre, sous forme de paillettes de *graphite*, de couleur noire ; sa cassure est alors terne et grise et elle laisse une trace noire sur les doigts. Une telle fonte, dite pour cette raison *fonte grise*, est douce, facile à usiner et relativement peu fragile.

Lorsqu'au contraire la fonte a été refroidie rapidement ou lorsqu'elle contient un pourcentage élevé de *manganèse*, le carbone s'y trouve en grande partie combiné avec le fer sous la forme d'un carbure blanc, brillant (cémentite) ; la cassure de la fonte est alors blanche. Une telle fonte est désignée sous le nom de *fonte blanche* : elle est beaucoup plus dure que la fonte grise, très difficile sinon impossible à usiner à l'outil, et aussi beaucoup plus fragile.

Il est très facile de reconnaître, à la lime, chacun de ces deux types de fonte. La plupart des pièces de fonte qui se présentent habituellement au soudeur sont d'ailleurs constituées par de la fonte grise.

En plus de ces deux types de fonte, il faut encore citer :

la *fonte malléable*, actuellement produite en traitant thermiquement de la fonte blanche de façon à décomposer la cémentite en fer d'une part et en fins nodules de graphite d'autre part ;

la *fonte nodulaire* (dite aussi *à graphite sphéroïdal* ou *fonte ductile*), apparue vers 1950. Grâce à l'adjonction d'éléments spéciaux comme le magnésium, le graphite s'y trouve non plus sous forme de paillettes à arêtes vives exerçant un effet d'entaille, mais bien sous forme de globules sphériques, ce qui diminue considérablement la fragilité de l'alliage et le fait utiliser aujourd'hui pour la fabrication de cylindres de laminoirs, de bâtis de machines, de tuyaux, etc.. où il tend à supplanter la fonte malléable et même l'acier de moulage ;

les *fontes alliées*, dans lesquelles on a introduit un élément tel que le chrome, le nickel, le molybdène, le cuivre, en vue d'améliorer certaines propriétés mécaniques, la résistance à la corrosion, aux hautes températures, à l'usure, etc...

La difficulté essentielle du soudage de la fonte à l'arc électrique réside dans la *nature même de la fonte*, qui rend cet alliage très sensible au refroidissement rapide. Celui-ci, lorsqu'il s'effectue à partir d'une température élevée, dénature la structure de la fonte, la faisant passer de l'état de *fonte grise*, à l'état de *fonte blanche*, très fragile et plus sujette de ce fait à des cassures au retrait.

Le soudage à l'arc étant caractérisé par un chauffage très localisé suivi d'un refroidissement rapide, tout procédé de soudage à l'arc appliqué à une pièce de fonte, *froide* ou même légèrement chauffée, apporte avec lui ces inconvénients, *quelle que soit la nature du métal déposé par l'électrode* et par conséquent quel que soit le type d'électrode utilisé.

A cet égard, il ne fait aucun doute que l'emploi du chalumeau oxyacétylénique (soudage autogène et soudo-brasage) soit, par nature, mieux approprié aux travaux de réparation des pièces de fonte (1).

Cependant, lorsque les obstacles rappelés ci-dessus peuvent être, non pas évités, mais plutôt "tournés", le soudage de la fonte à l'arc est susceptible de trouver certaines applications.

Avant de décrire les procédés utilisés, signalons que les fontes blanches sont pratiquement insoudables et que les fontes malléables et nodulaires se soudent comme la fonte grise. Toutefois, les propriétés des fontes malléables disparaissent dans les zones voisines de la soudure et c'est pourquoi le soudo-brasage (1) est pour ces fontes le procédé le mieux indiqué ; quant aux fontes nodulaires, leurs propriétés peuvent être conservées ou restaurées après soudage au moyen d'un traitement thermique.

Les procédés utilisés peuvent être groupés en deux catégories :

---

(1) L.MENDEL, Manuel Pratique de Soudage aux Gaz et de Coupage Thermique. Dunod, éd.

LE SOUDAGE À CHAUD

Il s'exécute sur pièce portée partiellement ou entièrement au rouge cerise, éventuellement dans un four. On la laisse refroidir très lentement à l'abri de l'air.

On emploie dans ce cas une électrode déposant de la *fonte* et qui se présente généralement sous forme de *fil fourré* (voir § 12). Celui-ci peut être utilisé au moyen d'un dispositif semi-automatique.

Ce procédé, dont la technique se rapproche de celle du soudage au chalumeau oxyacétylénique ne présente guère d'avantages par rapport à ce dernier. Il présente par contre des inconvénients :

a) La très grande fluidité de la fonte déposée à l'arc sur pièce portée au rouge gêne considérablement le travail ;

b) Dans bien des cas, la fusion et la conduite du laitier ne peuvent être observées convenablement ; en effet, le soudeur est souvent obligé de travailler avec une pince porte-électrode spéciale de grande longueur et ne peut approcher son écran du bain de fusion comme il est nécessaire de le faire pour souder correctement à l'arc (§ 6.6).

On peut donc considérer le soudage à chaud intéressant seulement dans le cas, assez rare, où l'atelier ne dispose pas d'un poste de soudage oxyacétylénique et est cependant obligé de procéder à l'exécution d'une soudure de fonte devant être à la fois résistante, étanche et usinable.

LE SOUDAGE À FROID

Dans ce procédé, on s'efforce de limiter à une cinquantaine de degrés C l'écart de température entre la soudure et les parties voisines. Si la température ambiante est par exemple de 15°C, les parties voisines de la soudure ne doivent pas être portées à plus de 65°C (température maximale supportable par la main nue en contact prolongé avec la pièce). Ceci conduit à procéder au soudage par fractions, en interrompant fréquemment le soudage afin de laisser refroidir la pièce.

Le soudage à froid comporte plusieurs variantes suivant l'électrode choisie.

Electrode à âme en nickel ou alliage [en ferro-nickel / en nickel pur / en métal Monel]

Electrode à âme en acier ..... [sans goujonnage / avec goujonnage]

Electrode à âme en bronze

a) Electrode à âme en nickel ou alliage

L'électrode en ferro-nickel est la plus utilisée, bien qu'elle

donne des soudures moins usinables que l'électrode en nickel pur. L'électrode en Monel, souvent utilisée il y a quelques années, a perdu beaucoup de sa faveur parce que son dépôt est souvent sensible à la fissuration. Dans les trois cas, un préchauffage léger et uniforme augmente les chances de réussite.

b) Electrode à âme en acier

- Sans goujonnage : Ces électrodes, utilisées directement en accrochage sur la fonte, déposent de l'*acier doux*. Suivant la nature de la fonte de base, ou bien il se forme une zone de transition constituée par un mélange d'acier et de fonte, très dur et très fragile, ou bien l'accrochage reste imparfait, sans pénétration, parsemé de défauts de liaison et notamment de soufflures. En tout état de cause, on ne peut guère compter sur la résistance d'une liaison de ce genre, ni sur son étanchéité.

- Avec goujonnage : On peut améliorer un assemblage exécuté au moyen de ces électrodes en procédant à un renforcement par *goujonnage*, applicable à partir de 10 mm d'épaisseur environ, pour autant, bien entendu, que la position des faces des chanfreins permette le perçage et le taraudage des logements des goujons.

Le chanfreinage de la cassure en V ou en X suivant l'épaisseur et l'accessibilité de l'envers, étant effectué suivant les indications du tableau 19 ci-dessous, on fixe dans les parois des chanfreins, après perçage et taraudage, des goujons d'acier doux. Cette fixation, qui se fait suivant les indications du tableau, doit être absolument *rigide*.

TABLEAU 19

Epaisseur (mm)	10 à 12	13 à 19	20 à 24	25 à 29	30 à 35		36 à 46		47 à 55	
Préparation	V70°	V70°	V70°	V70°	V70°	X70°	V70°	X70°	V70°	X70°
Diamètre des goujons (mm)	6	8	6	8	10	8	12	6	12	8
Nombre de rangées sur chaque face ou 1/2 face chfr.	1	1	2	2	2	1	2	2	3	2
Ecart. des goujons d'axe en axe (mm)	15	20	15	20	22	20	25	15	28	20
Ecart. des rangées d'axe en axe (mm)	-	-	12	15	18	-	20	12	18	15
Longueur goujon dépassant paroi (mm)	2	3	2	3	4	3	5	2	5	3

Le diamètre de l'électrode est choisi comme suit :

				plus de 30	
Epaisseur (mm)	.....	Jusqu'à 20	20 à 30	en V	en X
Diamètre (mm)	.....	3,25	4	5	4

On ne dépasse cependant pas 4 mm si la soudure se présente en paroi verticale.

Après avoir réalisé avec l'électrode un accrochage aussi bon que possible sur la fonte, autour des goujons (*fig.13.1*) , on rend ceux-ci *prisonniers l'un de l'autre* par rechargement au moyen des mêmes électrodes. En fait, il ne s'agit donc pas d'un véritable procédé de soudage de la fonte mais plutôt d'une sorte d'*agrafage* rendu indesserrable par une soudure (*fig.13.2*).

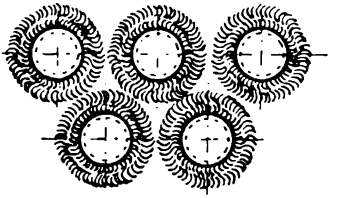


Fig.13.1

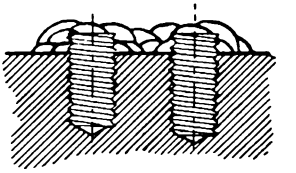


Fig.13.2

Diverses recommandations sont à retenir :

- Autant que possible, les goujons d'une face doivent être en quinconce par rapport à ceux de la face opposée, afin de gêner le moins possible l'accès de l'électrode. De même, lorsqu'il y a deux ou plusieurs rangées de goujons sur chaque face ou demi-face, les rangées doivent être disposées en quinconce.

- La profondeur d'ancrage doit être au minimum égale à une fois et demie le diamètre du goujon, mais il y a intérêt à percer les trous à des profondeurs différentes afin de ne pas créer un étage de faible résistance au niveau du fond des trous. Il est recommandable d'usiner les goujons en pointe de façon à éviter qu'il subsiste des espaces vides entre le fond conique du trou et le goujon.

- Chaque fois que la disposition de la cassure le permet, il est à conseiller de placer à la surface des pièces une rangée de goujons supplémentaires de chaque côté du joint (*fig.13.3*). Naturellement, le soudage doit intéresser ces deux rangées.

- Pour les faces de chanfrein qui se présentent au plafond, il faut réduire la longueur de dépassement à 2 mm quel que soit le diamètre du goujon.

- Il faut veiller tout spécialement au *bon contact* de la pince de masse ou de la table de soudage avec la pièce, en mettant à vif l'endroit de celle-ci où s'établit le contact ; à défaut de cette précaution, une forte chute de tension s'établit à cet endroit et rend l'amorçage de l'arc plus difficile.

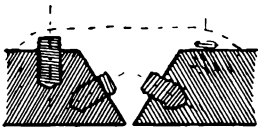


Fig.13.3

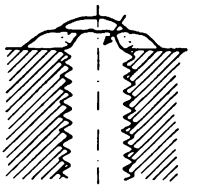


Fig.13.4

- Le soudage de la première passe autour des goujons doit être effectué avec une intensité suffisante pour obtenir la meilleure liaison possible ; le coeur du goujon doit cependant subsister à ras de la fonte (*fig.13.4*) .

- Afin d'éviter les cassures, le soudage doit se faire en petites passes étroites et courtes, et l'on doit passer par alternances d'un côté à l'autre de la pièce pour empêcher tout échauffement notable. Si celui-ci s'accentue, on suspendra le soudage jusqu'à ce qu'on puisse tenir la main à cet endroit. Il est donc nécessaire que le soudeur puisse être occupé entre temps à un autre travail.

Le procédé ainsi décrit, éventuellement combiné avec un renforcement par plaques d'acier goujonnées suivant le même principe (agrafes) s'applique avec intérêt aux pièces de grandes dimensions : bâtis, volants, etc..., qui ne peuvent être chauffées entièrement ni même partiellement de façon pratique. Il peut même servir à assembler des pièces d'acier avec des pièces de fonte.

Il présente toutefois deux inconvénients. D'une part, il nécessite une préparation longue et très coûteuse. D'autre part, en raison du caractère douteux de la liaison fonte-acier, l'étanchéité ne peut être obtenue que par des artifices tels que : insertion et matage préalables d'un "ver" en cuivre du côté intérieur, colmatage par rouillage au moyen d'agents chimiques, etc... L'efficacité de ces artifices reste aléatoire.

c) Electrode à âme en bronze d'aluminium

Les électrodes en bronze d'aluminium (alliage cuivre-aluminium) se recommandent particulièrement. Possédant un point de fusion inférieur à celui des électrodes citées jusqu'à présent pour le travail de la fonte, elles échauffent moins la pièce, l'assemblage se rapprochant ainsi d'une soudo-brasure au chalumeau oxyacétylénique. Il est évidemment hétérogène L'application la plus courante de ces électrodes est le rechargement de pièces soumises à l'usure ou à la corrosion.

13.2. Cuivre et alliages

Le cuivre et ses alliages se soudent très rarement à l'électrode métallique. En raison de la grande conductibilité électrique et

calorifique de ces métaux, il est en effet pratiquement impossible de fondre le métal de base sans l'avoir au préalable chauffé au rouge sombre. Ce préchauffage devant s'effectuer au chalumeau oxyacétylénique, il est alors bien plus indiqué d'utiliser cet appareil également pour le soudage (1).

Il y a lieu d'ajouter que l'emploi du soudage à l'arc implique la nécessité de supporter à l'envers les pièces à assembler, ce qui entraîne des complications.

Le courant de soudage doit être *continu* (électrodes au pôle +).

Diverses électrodes métalliques, toutes enrobées, ont été mises sur le marché, les unes en cuivre pur, les autres en alliages divers : bronze, cupro-phosphores, cupro-siliciums, etc.., fondant à plus basse température que le cuivre. Lorsque ces dernières sont utilisées pour l'assemblage de pièces en cuivre, l'assemblage obtenu est hétérogène et assez semblable à une soudo-brasure exécutée au chalumeau, sans présenter toutefois, en général, la même qualité que celle-ci.

Il est à noter que le soudage du cuivre sous protection gazeuse, (voir chap. 17) s'est sérieusement développé au cours des dernières années.

13.3. Nickel et alliages

Nous traiterons dans ce paragraphe du nickel et des principaux alliages contenant plus de 50% de ce métal et pour lesquels le soudage entre fréquemment en jeu. Il s'agit :

a) du *nickel* dit "pur", qui contient d'ailleurs, toujours du cobalt et dont la teneur totale en Ni+Co = 99,5% ; son point de fusion = 1445°C ;
b) des alliages nickel-cuivre (30 à 44% de cuivre) (2) dénommés *Monel*, dont le point de fusion = 1350°C ;
c) des alliages nickel-chrome-fer (15 à 22% de chrome et 5 à 19% de fer) dénommés *Inconel*, dont le point de fusion, suivant les nuances = 1335 à 1425°C ;
d) des alliages nickel-chrome-molybdène ou cobalt (16 à 22% de chrome et des teneurs variables en molybdène et/ou en cobalt) dénommés *Nimonic*, et dont le point de fusion, suivant les nuances, = 1290 à 1385°C.

Ces matériaux sont utilisés surtout pour leur bonne résistance à la corrosion, notamment à chaud, mais comme ils sont coûteux, il est assez rare que l'on emploie des épaisseurs supérieures à 3,2 mm sauf pour des applications très spéciales.

---

(1) Voir L. MENDEL, Manuel Pratique de Soudage aux Gaz et de Coupage thermique. Dunod, édit.
(2) Nous ne citons dans la composition que les principaux éléments d'alliage.

Pour permettre d'obtenir des soudures de qualité, les matériaux de cette catégorie doivent se trouver à l'état recuit * , c'est-à-dire exempts de tensions résiduelles * .

Le soudage aux électrodes enrobées est actuellement au point pour les matériaux suivants (1) :

Matériau de base	Electrodes recommandées
Nickel 200 ou 201	Nickel 141
Monel 400	Monel 190
Monel K-500	Monel 134
Inconel 600 (AFNOR N-C15 Fe)	Inconel 132 ou 182
Inconel 625	Inconel 112
Nimonic 75 (AFNOR N-C20 T)	Inconel 132

L'enrobage de toutes ces électrodes est hygroscopique, il faut donc les faire sécher en étuve avant usage, à au moins 120°C et même jusqu'à 250°C (maximum) si elles sont humides par suite d'un mauvais stockage.

Le courant continu (électrode au pôle +) est généralement utilisé. Certaines électrodes permettent cependant l'emploi du courant alternatif. Les intensités recommandables en fonction du diamètre de l'électrode sont les suivantes :

Electrode mm	Nickel 141	Monel 190	Inconel 132-182
2,4	70 à 105	55 à 75	40 à 65
3,2	100 à 135	75 à 110	65 à 100
4	120 à 175	110 à 150	90 à 130
4,8	170 à 225	150 à 190	125 à 165

La préparation des joints et leur mode d'exécution sont sensiblement les mêmes que pour les aciers ordinaires. Il est généralement conseillé d'utiliser une électrode d'assez faible diamètre et, s'il y a lieu de souder en plusieurs passes, de laisser refroidir entre celles-ci.

13.4. Aluminium et alliages légers

Dans l'exécution des assemblages devant être étanches, on a utilisé presque exclusivement jusqu'à ces dernières années le soudage oxyacétylénique. Ce dernier procédé est encore employé, notamment pour les tôles minces. Par contre, le soudage à l'arc avec électrodes enrobées, qu'on avait tenté de développer dans le but de réduire les déformations dues au soudage, a été complètement supplanté par les diverses techniques de soudage sous protection gazeuse (chap. 17).

(1) Le soudage sous protection gazeuse MIG et surtout TIG (voir chap. 17) s'étend à un plus grand nombre de nuances.

QUATRIÈME PARTIE
PROCÉDÉS SPÉCIAUX

CHAPITRE 14

SOUDAGE SOUS FLUX SOLIDE ÉLECTRO-CONDUCTEUR OU EN ARC SUBMERGÉ

14.1. PRINCIPE ET CARACTÉRISTIQUES DU PROCÉDÉ

Ce procédé (schéma *fig.14.1*) a été mis au point entre 1935 et 1940, à la fois aux Etats-Unis et en U.R.S.S. Il s'applique principalement à l'acier. Suivant son principe, l'arc s'établit entre un fil nu continu (généralement cuivré) plongeant dans une poudre appelée *flux* et la pièce à souder recouverte de cette poudre.

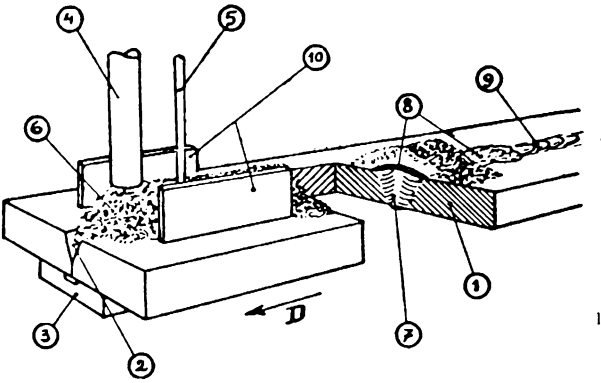


Fig.14.1

1 = pièce à souder.
2 = chanfrein.
3 = support de la pièce à souder.
4 = manche d'amenée du flux, solidaire du porte-électrode.
5 = fil électrode.
6 = flux.
7 = coupe du joint soudé.
8 = laitier.
9 = surface de la soudure.
10 = supports latéraux du flux, solidaires du porte-électrode.

Le fil est porté par une bobine appelée dévidoir. *Peu au-dessus de la surface de la pièce*, il passe à travers un dispositif raccordé à la source de courant (ce dispositif ainsi que le dévidoir ne sont pas représentés sur le schéma). Le déroulement du fil au fur et à mesure de sa fusion et en général l'avancement du porte-électrode par rapport à la pièce (1), ainsi que la longueur de l'arc, sont réglés au moyen de dispositifs automatiques.

Le flux, dont il existe plusieurs qualités selon les applications, est constitué par un mélange granulé de composition analogue à celle des enrobages pour électrodes manuelles. Son rôle n'est pas

(1) Dans certains cas, c'est la pièce qui se déplace devant une tête de soudage fixe.

seulement de protéger le bain de fusion vis-à-vis des gaz de l'atmosphère, mais aussi d'apporter au métal fondu des éléments d'addition améliorants. Il est déversé un grand excès de flux, mais celui-ci, après refroidissement du joint, est aspiré et renvoyé à des récupérateurs.

Des intensités de courant très élevées, allant jusqu'à 2000 et même 3000 A, peuvent être utilisées grâce aux particularités suivantes :
a) une faible longueur de l'électrode étant parcourue par le courant ainsi que nous venons de le voir, le restant du fil ne s'échauffe que très peu ;
b) l'arc étant recouvert par une épaisse couche de flux et de ce fait invisible, aucun éblouissement ne se produit ; un arc à plus de 300 A et qui serait visible exigerait de très grandes précautions en raison de l'intensité de la lumière produite, notamment sous forme de rayons ultra-violets * et infra-rouges * .

Comme le bain de fusion est invisible, tous les réglages : tension d'arc, intensité, vitesse de déroulement du fil, vitesse d'avancement de la soudure, doivent être effectués avec précision. Ils nécessitent un appareillage électrique important ainsi que des dispositifs de guidage perfectionnés, tous deux coûteux et, dans chaque cas nouveau, une laborieuse mise au point préalable de la machine.

Grâce au déroulement continu du fil, à la possibilité d'emploi de très gros diamètres (jusqu'à 10 mm) et de très fortes intensités, grâce aussi au rendement thermique très élevé résultant de la position de l'arc en grande partie au-dessous de la surface de la tôle, enfin grâce à la suppression des temps d'arrêt pour changement d'électrodes, on arrive à exécuter des soudures à très grande vitesse et à coût de revient très réduit.

A titre d'exemple, le soudage bout à bout de tôles d'acier doux de 20 mm d'épaisseur peut se faire à la vitesse de 4,5 minutes par mètre à deux opérateurs, soit 9 minutes de main-d'oeuvre, contre 45 minutes dans les conditions les plus favorables en soudage à l'arc avec électrodes manuelles à apport de métal par l'enrobage.

L'aspect des soudures réalisées est remarquable. Le flux fondu subsiste à l'état vitrifié sur le cordon mais il se détache facilement et laisse alors apparaître une surface nette et régulière, presque lisse.

Les matériaux auxquels le procédé a été appliqué jusqu'ici sont surtout l'acier doux ou faiblement allié. On a cependant assemblé également des pièces en alliages de cuivre, d'aluminium ou de titane, moyennant bien entendu l'emploi de flux spéciaux.

Un inconvénient du procédé, c'est qu'il n'est facilement applicable qu'à plat. Si l'inclinaison des tôles sur l'horizon dépas-

se une dizaine de degrés, son emploi devient très difficile, voire impossible.

D'autre part, étant donné le coût très élevé des installations de soudage sous flux, non seulement des machines de soudage elles-mêmes mais aussi des puissants transformateurs nécessaires à leur alimentation, ce procédé ne peut guère s'envisager que pour des fabrications en série comme, par exemple, l'exécution des cordons de soudure rectilignes de grande longueur sur des tôles de plus de 5 mm d'épaisseur, le soudage de tôles très épaisses (20 à 80 mm) et de grande longueur également, travaux pour lesquels l'économie est considérable par rapport au soudage à l'arc manuel.

Le soudage sous flux électro-conducteur a trouvé d'intéressantes applications notamment en construction navale, dans la construction des tubes de grand diamètre, des réservoirs et des chaudières, ainsi que pour les travaux de rechargement importants. Il rencontre d'ailleurs un sérieux concurrent dans le soudage automatique sous atmosphère d'anhydride carbonique (voir § 17.16).

On notera enfin qu'un procédé intermédiaire entre le soudage sous flux électro-conducteur et le soudage sous protection gazeuse consiste dans l'emploi,en lieu et place de fil nu et de flux granulé séparé, d'un *fil fourré* de flux (v. page 140 et § 12.2.e ainsi que *fig.12.1*). La buse porte-fil est alors entourée d'un manchon débitant un courant de gaz protecteur. Ce système est particulièrement utile pour les rechargements anti-usure.

14.2. Le procédé "Electroslag" ou soudage sous laitier

Le procédé "Electroslag" (slag = laitier), originairement mis au point en U.R.S.S., vers 1953, constitue une variante au procédé décrit au § précédent. Il a trouvé d'intéressantes applications en soudage des aciers ordinaires et spéciaux en très fortes épaisseurs.

Il est caractérisé (*fig.14.2*) par le fait que le soudage s'effectue verticalement et en montant. Le bain de fusion se forme entre des glissières ou patins G en cuivre, refroidis à l'eau, constituant une sorte de coffrage ou de moule, se déplaçant automatiquement de bas en haut au fur et à mesure de l'avancement de la soudure.

Celle-ci s'effectue entre bords droits fortement écartés (d = 25 à 35 mm) entre lesquels se produit un bain de fusion métallique M surmonté d'un bain de laitier électro-conducteur L produit au départ d'un flux en poudre, et dont la profondeur peut atteindre 40 à 60 mm.

Le métal d'apport est généralement constitué par une à trois électrodes nues (suivant l'épaisseur e) en fil continu, souvent soumises à un mouvement d'oscillation dans le plan axial et plongeant,

après que le processus a été amorcé par soudage à l'arc, dans le bain de laitier électro-conducteur.

Le procédé, qui s'applique au moyen de machines fortement automatisées, est utilisé pour le soudage de corps cylindriques, de grosses presses et autres grands bâtis de machines, de cages de laminoirs, de grosses tôles pour la construction navale, ainsi que pour des rechargements très importants.

Les épaisseurs considérées vont de 35 à 150 mm. La vitesse d'exécution atteint 2 fois celle du procédé décrit au § 14.1 pour une épaisseur de 40 mm, 4 fois pour 90 mm et 8 fois pour 150 mm.

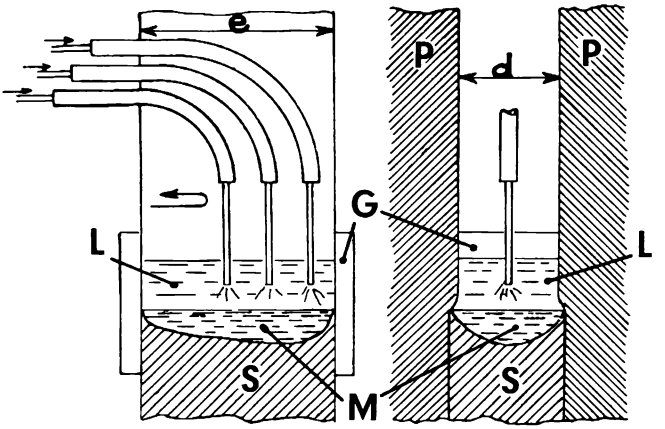


Fig.14.2

A gauche : *vue en coupe suivant l'épaisseur* e *de la pièce à souder.*
A droite : *vue en coupe suivant le plan des électrodes.*
P = pièce à souder -
e = épaisseur de la pièce à souder -
d = écartement des bords -
G = glissières
L = bain de laitier électroconducteur -
M = bain de fusion du métal -
S = métal solidifié (soudure terminée).

CHAPITRE 15

SOUDAGE ET GOUGEAGE A L'ARC ÉLECTRIQUE A L'ÉLECTRODE EN CARBONE

15.1. PRINCIPE ET CARACTÉRISTIQUES DU PROCÉDÉ

Nous avons fait ressortir au § 1.2.b , comment se situait ce procédé par rapport aux autres procédés de soudage à l'arc.

Les points importants à retenir sont l'indépendance de l'apport de chaleur et de l'apport de métal, et d'autre part, l'usure relativement lente de l'électrode.

L'arc au charbon s'utilise donc, une fois amorcé, à la manière d'une flamme, et c'est pourquoi le mode opératoire de ce procédé ressemble plus à celui du soudage au chalumeau qu'à celui du soudage à l'électrode métallique.

Cependant, les différences avec le soudage au chalumeau restent importantes :

a) Tandis que la flamme oxyacétylénique normalement réglée (1) est *neutre*, c'est-à-dire ne provoque ni carburation * ni oxydation de l'acier en fusion, l'arc au charbon, à chaque amorçage ou réamorçage ou s'il est maintenu trop court, carbure l'acier et le rend de ce fait plus dur et plus cassant. Si l'arc est allongé, il peut se produire au contraire une oxydation ou une nitruration (voir § 3.1).
b) La visibilité du travail est bien moins bonne qu'en soudage au chalumeau car les verres colorés de l'écran ou du casque du soudeur à l'arc doivent être considérablement plus foncés que les verres des lunettes du soudeur au chalumeau. A habileté égale, le travail de soudage est donc moins précis.
c) Lorsqu'il travaille avec métal d'apport, le soudeur à l'arc au charbon doit porter un *casque*, tandis que le soudeur au chalumeau porte de simples lunettes à verres colorés.

A l'heure actuelle, le soudage à l'électrode en carbone, dépassé par les diverses techniques de soudage à l'arc protégé, n'est plus

(1) Voir L. MENDEL, Manuel Pratique de Soudage aux Gaz et de Coupage thermique. Dunod, édit.

que rarement employé (bouchage des trous dans certaines pièces de fonderie par exemple). Par contre, il en est dérivé une technique d'*enlèvement de métal*, rentrant dans la catégorie des procédés de *coupage thermique*, et que nous décrirons sommairement ci-après (1).

15.2. GOUGEAGE OU RAINURAGE À L'ÉLECTRODE DE GRAPHITE

Ce procédé, commercialement dénommé "ARCAIR", repose sur l'établissement d'un arc entre une électrode de graphite et une pièce de laquelle on désire enlever du métal (aciers au carbone, inoxydables, réfractaires, à 14% de manganèse, ainsi que métaux et alliages non-ferreux).

L'électrode ou "crayon" est tenue dans une pince porte-électrode ou "torche", de forme spéciale (*fig.15.1*), alimentée d'une part en courant électrique généralement continu et d'autre part en air comprimé, par un câble unique, creux. La torche est raccordée au pôle positif, la pièce au pôle négatif. Le jet d'air comprimé débouche parallèlement à l'électrode par des orifices ménagés dans une des mâchoires de la pince porte-électrode et chasse le métal mis en fusion par l'arc. Ce jet d'air doit être suffisamment puissant (6 à 8 bars) pour chasser ce métal avant que ses abords aient eu le temps de subir une carburation par l'électrode. D'autre part, la tête de la torche, qui est rotative, doit toujours être tenue de façon à envoyer le jet d'air derrière le point d'impact de l'arc sur la pièce.

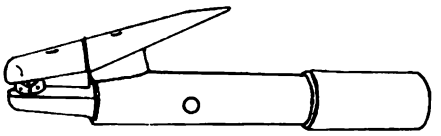


Fig.15.1

Les crayons de graphite ont un diamètre que l'on choisit en fonction de l'intensité nécessaire, qui dépend elle-même de la section de la rainure à exécuter. Ce diamètre va de 4 mm pour une intensité de 80 à 150 A, à 16 mm pour une intensité de 600 à 1000 A. Entre ces deux limites, le procédé peut enlever, par électrode, un poids de métal allant, pour l'acier, de 100 grammes à 3,8 kg.

La principale application, souvent automatisée, du procédé, est le gougeage des racines des soudures avant leur reprise à l'envers (voir § 6.11 et *fig.6.22*) . Cette opération est 3 à 5 fois plus rapide et considérablement moins bruyante que le burinage pneumatique et 10 à 15 fois plus rapide que le meulage. On peut utiliser le même procédé pour l'enlèvement des zones défectueuses révélées dans les soudures par la radiographie, ainsi que pour d'autres opérations de préparation de surfaces d'acier.

---

(1) Un exposé plus détaillé sur ce procédé figure dans le "Manuel de Soudage aux Gaz et de coupage thermique" du même auteur, Dunod, édit.

CHAPITRE 16

SOUDAGE A L'HYDROGÈNE ATOMIQUE

16.1. PRINCIPE ET CARACTÉRISTIQUES DU PROCÉDÉ

L'hydrogène à l'état gazeux, libre, est constitué de *molécules* * qui se représentent par le symbole H_2, contenant chacune deux atomes * , représentés par le symbole H.

A la température ordinaire, les molécules gazeuses ne peuvent être séparées en leurs atomes. Par contre, si de l'hydrogène est soumis à une température supérieure à 2400°C, par exemple au moyen d'un arc électrique jaillissant entre deux électrodes de tungstène (1) et dont la température est de 3700°C, il se produit une dissociation des molécules

$$H_2 \rightarrow 2\,H\ .$$

Cette dissociation ou *atomisation* absorbe une grande énergie calorifique. Celle-ci est restituée par la réaction inverse

$$2\,H \rightarrow H_2$$

à une distance des électrodes à laquelle la température est inférieure à 2400°C, et le résultat de ces deux réactions équivaut à un transport d'énergie beaucoup plus intense à partir des électrodes.

Or, le pouvoir réducteur * de l'hydrogène à l'état d'atomes, ou *hydrogène atomique*, est bien plus considérable que celui de l'hydrogène moléculaire. Il s'ensuit que la température de combustion de l'hydrogène atomique est sensiblement plus élevée que celle de l'hydrogène moléculaire, et que l'hydrogène atomique possède des propriétés réductrices très remarquables.

La "flamme" de l'hydrogène atomique (*fig.16.1*) possède de ce fait une température de l'ordre de 5000°C c'est-à-dire supérieure à celle de l'arc électrique normal. Elle se présente sous la forme d'un papillon violacé extrêmement éblouissant, qui peut servir à souder tout comme une flamme oxyacétylénique :

---

(1) Le tungstène a été choisi en raison de sa température de volatilisation très élevée : 5900°C environ.

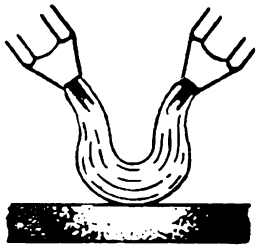


Fig.16.1

a) Soit sans métal d'apport ;
b) Soit par l'utilisation d'une baguette de métal d'apport indépendante de l'arc et que l'on fond dans le bain de fusion.

Plus encore que le soudage à l'arc à l'électrode en charbon, le soudage à l'hydrogène atomique se rapproche du soudage au chalumeau. En effet, non seulement l'apport de chaleur est indépendant de l'apport de métal, mais encore le métal de base n'est pas dans le circuit électrique.

Nous n'entrerons plus dans le détail à propos de ce procédé, car il a été progressivement supplanté par les divers procédés de soudage à l'arc sous protection gazeuse (chap. 17).

CHAPITRE 17

LES PROCÉDÉS DE SOUDAGE A L'ARC SOUS PROTECTION GAZEUSE

17.1. PRINCIPE DES PROCÉDÉS

Ces procédés, dont l'invention remonte à 1940 à 1942, ont acquis à ce jour un développement considérable.

A l'origine, il s'agissait simplement de l'emploi d'un arc électrique jaillissant entre une électrode en tungstène (tenue par une pince manuelle) et la ou les pièces à souder, cet arc étant entouré d'un jet de gaz inerte * très pur tel que l'hélium *.

Actuellement, la technique du soudage sous protection gazeuse, le plus souvent automatisée en partie ou entièrement, comporte un grand nombre de variantes, et toute une gamme de gaz ou de mélanges gazeux sont utilisés suivant le cas : de l'argon * , de l'hélium, de l'anhydride carbonique (CO_2) * , enfin des mélanges spécialement préparés de ces différents gaz entre eux et parfois même avec de l'oxygène ou de l'hydrogène.

17.2. CLASSIFICATION DES DIVERS PROCÉDÉS

a) Soudage à l'électrode réfractaire (TIG)

Dans ce procédé, l'arc s'établit entre une baguette ou électrode en tungstène, réfractaire c'est-à-dire non fusible aux températures qui entrent en jeu (1) et la pièce à souder. Le sigle TIG universellement adopté s'explique par la dénomination américaine "tungsten inert gas". Le procédé s'exécute soit sans métal d'apport (*fig.17.1*) soit avec un métal d'apport indépendant du circuit électrique (*fig. 17.2*).

b) Soudage à l'électrode consommable (MIG)

L'arc jaillit dans ce cas entre un fil de métal d'apport continu et amené automatiquement, et la pièce à souder (*fig.17.3*) . Le pro-

(1) La température de fusion du tungstène est de 3410°C.

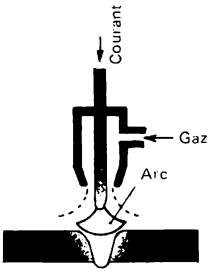


Fig.17.1

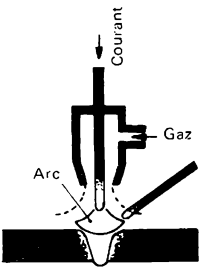


Fig.17.2

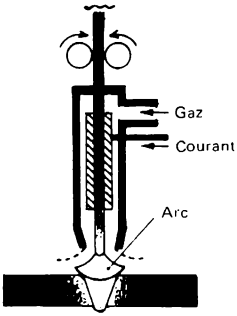


Fig.17.3

cédé est dénommé aux Etats-Unis "metal inert gas", d'où le sigle MIG. Dans certains cas, le gaz utilisé n'est pas un gaz inerte mais un gaz actif ; le procédé est alors désigné par MAG ("metal active gas").

c) Soudage au plasma

Ce procédé est parfois classé dans la catégorie de ceux de soudage à l'arc sous atmosphère gazeuse. Nous le considérerons plutôt comme un procédé à part et le décrirons séparément dans le chapitre 18.

17.3. Avantages globaux des procédés de soudage sous protection gazeuse

Les procédés TIG et MIG présentent, par rapport au soudage manuel aux électrodes enrobées, trois avantages majeurs qui reposent sur l'absence de flux solide et par conséquent de laitier :

a) Le bain de fusion est clairement visible, ce qui rend sa conduite plus facile et améliore le contrôle de la pénétration ;
b) L'opération d'enlèvement du laitier étant éliminée, il en résulte un gain de temps important ;
c) La suppression de cette opération discontinue rend possible et généralement facile l'automatisation des deux procédés.

17.4. Le procédé TIG

Champ d'application

Bien que ce procédé ait été appliqué à de nombreux métaux, son domaine préférentiel d'application comprend l'aluminium et ses alliages, les aciers inoxydables austénitiques (voir § 11.5) , le nickel et ses alliages, le cuivre et le titane.

Les gaz utilisés

Ces gaz sont essentiellement l'argon (surtout en Europe), l'hélium et leurs mélanges car tout gaz non inerte contaminerait l'électrode en tungstène. Le rôle de ces gaz est de former autour de l'arc une enveloppe protectrice continue qui empêche l'accès de l'air au bain de fusion et l'action nocive de l'oxygène et de l'azote constituant cet air. En outre, les gaz inertes sont insolubles dans les métaux en fusion ; ils ne peuvent donc être retenus dans les cordons de soudure sous forme de gaz dissous donnant lieu après refroidissement à des soufflures ou des piqûres.

Avantages particuliers du procédé TIG

Le principal avantage du procédé TIG résulte de l'indépendance qui existe entre l'apport de chaleur et l'apport de métal, particularité que le procédé partage avec le soudage à l'hydrogène atomique (chap. 16) et surtout avec le soudage au chalumeau (§ 1.2). Il permet donc de souder, soit sans apport de métal, ce qui est le cas du soudage des tôles minces, soit avec apport de métal, Son mode opératoire présente d'ailleurs des analogies marquées avec celui du soudage au chalumeau.

17.5. L'APPAREILLAGE DU PROCÉDÉ TIG

a) Les bouteilles de gaz et leur détendeur (1)

Les gaz protecteurs sont livrés dans des bouteilles d'acier analogues à celles utilisées pour l'oxygène et dans lesquelles ils sont comprimés à environ 2000 N/cm^2 (200 bars). Ces gaz, dont le principal est l'argon, doivent être rigoureusement secs. Il est recommandé de ne jamais vider entièrement les bouteilles afin d'éviter toute

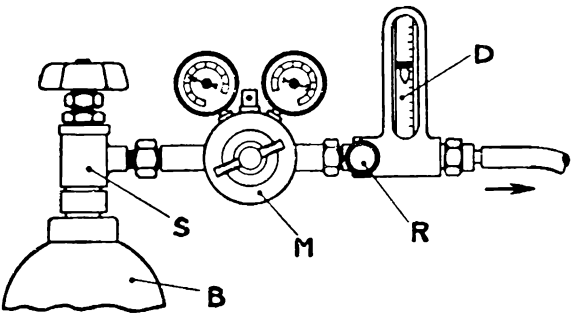


Fig.17.4

B : bouteille
S : robinet de la bouteille
M : détendeur
R : robinet de réglage
D : débitmètre à flotteur

(1) Pour plus de détails sur la description des bouteilles et du détendeur ainsi que sur le fonctionnement de ce dernier, voir L.MENDEL "Manuel Pratique de Soudage aux Gaz et de Coupage thermique, Dunod. édit.

rentrée d'air préjudiciable à la pureté du gaz emmagasiné lors du rechargement suivant. Une bouteille contient suivant son format 8000 à 10000 litres de gaz.

Sur la bouteille se fixe un détendeur M permettant de régler la pression de sortie et de la maintenir constante. Ce détendeur est muni de deux appareils de contrôle : un manomètre qui indique la pression dans la bouteille et un débitmètre qui peut être à cadran ou à flotteur (*fig.17.4*), qui sert à contrôler le débit du gaz et qui est gradué en litres par minute.

b) La torche

La torche est l'appareil qui sert à manipuler l'électrode en tungstène et à lui amener le courant électrique ainsi que le gaz protecteur.

Pour des courants de soudage allant habituellement jusqu'à 150 à 200 Ampères, elle peut être à refroidissement par l'argon lui-même (refroidissement naturel) ; au-delà , elle doit être à refroidissement par circulation d'eau (1).

A titre d'exemple, la tête d'une torche à refroidissement naturel est représentée en coupe *fig.17.5* .

Pour chaque type de torche, le constructeur indique, pour un facteur de marche donné, le courant maximal qui ne peut être dépassé sans risque d'endommager la torche.

Le câble de soudage, les tuyaux souples pour l'argon et le cas échéant l'eau sont généralement rassemblés dans une gaine souple en plastique afin de les protéger et d'éviter leur dispersion.

Les buses de sortie du gaz, de différents diamètres suivant le débit de celui-ci, sont soit en céramique, en alumine, ou encore, en cuivre chromé pour les fortes intensités.

---

(1) La nécessité du refroidissement par eau dans le cas des courants moyens et forts s'explique comme suit : la torche, devant être fortement isolée, ne se refroidit pas naturellement. Elle contient un tube d'amenée d'argon et un ou plusieurs câbles et, pour pouvoir conserver à la torche une légèreté et une maniabilité suffisantes, on est amené à utiliser des câbles de faible section qui peuvent s'échauffer fortement. En outre, les organes intérieurs de la torche comportent normalement des raccords mécaniques qui risquent de constituer des contacts imparfaits qui contribuent à l'échauffement.

c) Les électrodes en tungstène

Chaque torche est livrée avec un jeu d'électrodes. Celles-ci, dont le diamètre varie de 1 à 6,4 mm (1) suivant l'intensité désirable, sont généralement soit en tungstène pur (meilleure stabilité de l'arc en courant alternatif), soit en tungstène *thorié*, c'est-à-dire contenant de petites quantités de thorium et d'oxyde de thorium (amorçage de l'arc plus facile en courant continu, densité de courant admissible plus élevée, usure moindre mais prix d'achat plus élevé). Afin d'assurer une bonne pénétration, il est recommandé de les tailler en pointe à extrémité arrondie (*fig.17.6*) et de polir soigneusement celle -ci. Ceci permet d'éviter le tourbillonnement de l'arc.

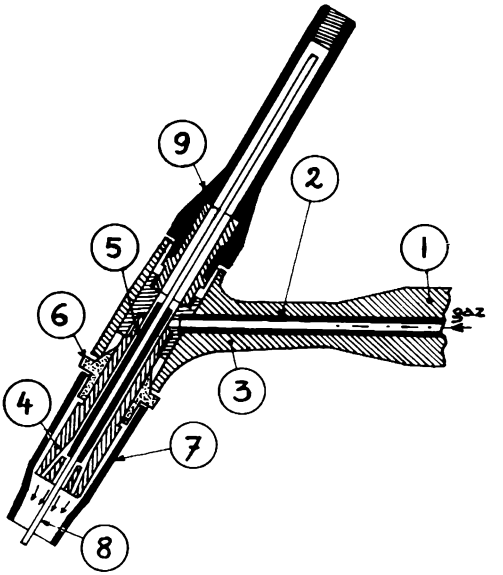


Fig.17.5

1. Manche isolé
2. Câble creux
3. Corps de torche isolé
4. Corps de porte-électrode
5. Porte-électrode
6. Isolateur
7. Buse de sortie argon
8. Electrode en tungstène
9. Coiffe servant de clef de serrage au porte-électrode.

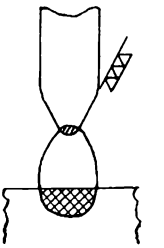


Fig.17.6

d) Choix du type de courant et de sa source

Ainsi que nous le verrons par la suite, le courant alternatif est indispensable pour le soudage de l'aluminium, du magnésium et de leur alliages, tandis que le courant continu s'emploie pour les autres matériaux que nous avons cités.

Pour alimenter la torche en courant *continu*, on peut se servir de groupes de soudage rotatifs (voir *fig.2.14*) ou de transformateurs-redresseurs de soudage (voir § 2.8).

Les groupes ont l'avantage d'être insensibles aux variations de

(1) Les électrodes ont des diamètres de 1-1,6-2-2,5-3-4-5 ou 6 mm pour usage sur des torches de construction française, et de 1,6-2,4-3,2-4,8 ou 6,4 mm pour les torches de construction américaine ou britannique.

la tension d'alimentation du réseau. Par contre, ils sont bruyants et leur courant de soudage n'atteint pas sa valeur normale dès le démarrage mais seulement lorsque le groupe s'est échauffé jusqu'à sa température de régime.

Les transformateurs-redresseurs présentent l'inconvénient d'être très sensibles aux variations de la tension du réseau, mais ceci peut être corrigé par l'adjonction d'un stabilisateur de tension. Par contre, ils sont silencieux et ne nécessitent pratiquement aucun entretien. La *fig.17.7* représente schématiquement une installation de soudage TIG avec transformateur-redresseur pour soudage en courant continu, électrode au pôle - .

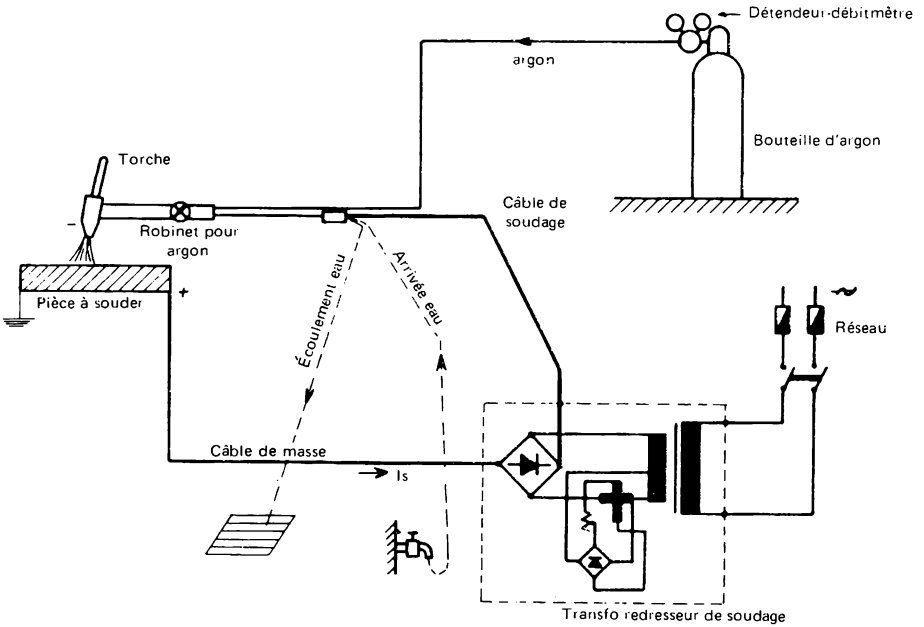


Fig.17.7 Schéma de principe d'une installation de soudage à l'argon. Procédé TIG courant continu.

S'il s'agit d'appareils normalement prévus pour le soudage à l'arc avec électrodes enrobées, il faut noter que la tension d'arc en soudage à l'argon n'est que la moitié environ de la tension conventionnelle en charge ; le courant de soudage réel est de ce fait de $\pm$ 5% plus élevé que le courant réglé, et il faut en tenir compte afin de ne pas dépasser le courant maximal indiqué sur l'appareil.

Lorsque l'application requiert l'emploi du courant *alternatif*, on se sert de transformateurs de soudage (voir § 2.8). En raison de la faible tension d'arc en soudage à l'argon, il est nécessaire de limiter le courant de soudage à 70% de la valeur maximale autorisée.

e) Stabilisateur d'arc

En général, l'amorçage de l'arc en soudage à l'argon ne s'effectue pas comme en soudage avec électrodes enrobées par contact du bout de l'électrode avec la pièce. Ce contact, dans le cas d'une électrode en tungstène, aurait pour conséquence de contaminer le métal soudé et l'électrode elle-même. La présence de tungstène dans la soudure, particulièrement dans le cas de l'aluminium et de ses alliages, aurait une influence désastreuse sur la résistance de l'assemblage à la corrosion.

C'est pourquoi on incorpore à l'installation de soudage, toujours dans le cas du soudage en alternatif et parfois dans celui du soudage en continu, un stabilisateur d'arc. Ce dernier peut être un *générateur à haute fréquence* (*fig.2.19*) ou un *générateur d'impulsions de tension*, ce dernier seulement dans le cas du courant alternatif.

La *fig.17.8* représente schématiquement une installation de soudage TIG en courant alternatif avec stabilisateur d'arc. Celui-ci est toujours branché sur la phase du réseau qui alimente le courant de soudage afin que la synchronisation des deux courants assure un décapage convenable du bain de fusion.

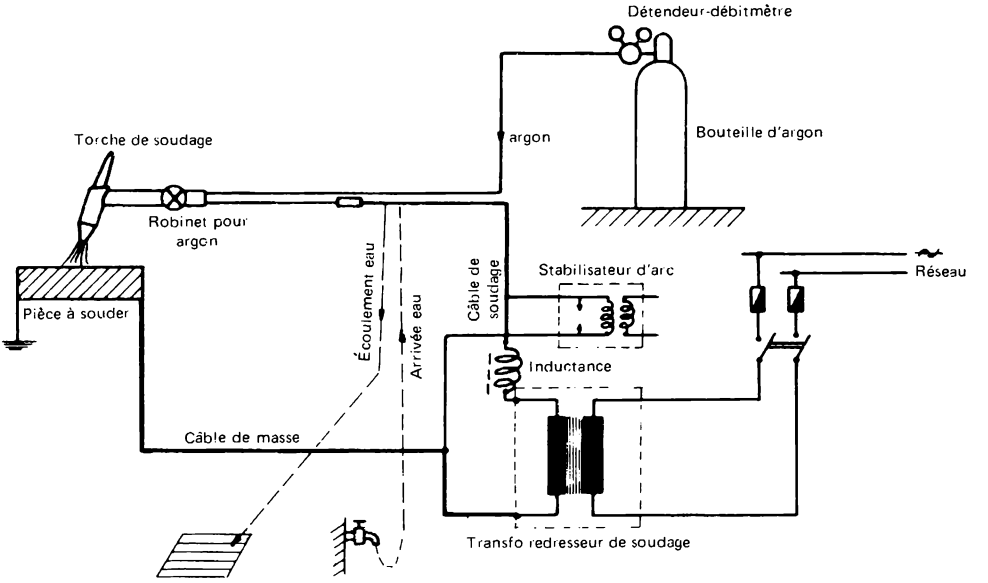


Fig.17.8 Schéma de principe d'une installation de soudage à l'argon. Procédé TIG courant alternatif.

f) Appareillage complémentaire

Dans certaines installations, une vanne électromagnétique est branchée sur la canalisation d'argon, elle est alimentée en courant à basse tension (24 V) par un petit transformateur auxiliaire. L'interrupteur se trouvant sur la torche permet d'ouvrir ou de fermer l'arrivée d'argon.

Dans les installations perfectionnées, un relais temporisateur du débit d'argon maintient ce débit quelques secondes après la coupure du courant afin que l'électrode se refroidisse dans l'argon et ne s'oxyde pas.

g) Automatisation du procédé TIG

Ce procédé s'adapte particulièrement bien à une automatisation pouvant aller jusqu'à une programmation complète réalisée au moyen de dispositifs électroniques de haute précision.

La torche, au lieu d'être dirigée à la main, est alors fixée sur un chariot pourvu d'une crémaillère réglable et dont l'avancement est commandé par un moteur électrique. Dans le cas du soudage avec métal d'apport, il en est de même du dispositif de dévidage du fil de ce métal. Dans certaines machines très perfectionnées, un ensemble électronique oblige la torche à suivre un tracé rigoureusement parallèle à celui du joint. Les défauts de forme ou de positionnement des pièces sont ainsi automatiquement compensés ; la constance de la longueur de l'arc et celle de la pénétration sont de ce fait assurées.

La diversité et la complexité de ces machines ne nous permettent pas d'aborder leur description dans le cadre de cet ouvrage ; elles sont d'ailleurs toujours livrées avec une notice qui donne tous les détails désirables sur la façon de les conduire et notamment sur les "paramètres de soudage" à observer. C'est pour faciliter la compréhension de ces notices par l'opérateur que nous expliquons ci-après ce qu'il faut entendre par ces paramètres.

h) Paramètres de soudage (1)

Le soudeur sur machines dépend pour une très large part de l'appareillage dont il dispose, et par conséquent sa marge de manoeuvre est beaucoup plus étroite qu'en soudage manuel. Aussi doit-il avoir une claire notion des facteurs qui influencent l'exécution de son travail et qu'on désigne sous le nom de *paramètres de soudage*.

Ces paramètres * sont les différentes caractéristiques, géné-

(1) La notion de ces paramètres est en fait également valable pour le soudage manuel, mais c'est surtout pour le soudage automatique (TIG et plus encore MIG) qu'elle a une grande importance.

ralement chiffrables, dont l'ensemble permet de définir les conditions d'exécution d'une soudure. On peut distinguer :

les paramètres *géométriques*, qui concernent : le mode de préparation des bords à souder, la position dans laquelle la soudure doit être exécutée (à plat, en corniche, etc...) , le diamètre des électrodes et celui du fil ;

les paramètres *électriques* : choix du courant (continu ou alternatif), polarité de l'électrode dans le cas du courant continu, intensité du courant, tension à vide, tension d'arc, impédance * , longueur de l'arc, etc... ;

les paramètres *mécaniques* : vitesse d'avancement relative de la torche par rapport à la pièce, vitesse de dévidage du fil de métal d'apport.

Le réglage des paramètres électriques et mécaniques s'effectue au moyen des différents organes de commande de la machine de soudage.

Il faut encore ajouter les paramètres intéressant spécialement la *protection gazeuse* : composition et débit du gaz.

Tous ces paramètres font généralement l'objet d'un bordereau établi pour chaque cas nouveau et qui sera consulté chaque fois que le même cas se représentera.

Il ne faut cependant pas perdre de vue que les paramètres de soudage sont déterminés pour un appareillage donné et qu'ils ne peuvent servir qu'à titre indicatif pour un autre appareillage. C'est pourquoi, dans ce manuel, nous ne donnerons qu'exceptionnellement, et à titre d'exemples, des tableaux de paramètres. Nous conseillerons donc aux agents de maîtrise et aux soudeurs de s'en tenir aux tableaux qui sont normalement donnés par le constructeur de l'appareillage utilisé.

17.6. Technique du soudage TIG de l'aluminium et des alliages légers

a) Gaz de protection utilisé

Ce gaz est toujours, en Europe, de l'argon à haute pureté, sauf pour certaines applications de soudage automatique à grande vitesse où l'on emploie parfois des mélanges argon-hélium ou même de l'hélium pur.

b) Choix du courant

Nous avons vu que pour ces matériaux, l'emploi du courant alternatif était généralisé ainsi que celui d'un stabilisateur d'arc soit par générateur haute fréquence soit par générateur d'impulsions de tension. C'est une condition qui est imposée par la nécessité de

maintenir, au cours du soudage, la surface de la pièce débarrassée en permanence de la pellicule d'oxyde d'aluminium ou alumine qui sans cela la recouvrirait et empêcherait la liaison. En soudage automatique sous hélium, on emploie cependant du courant continu.

c) Nettoyage et décapage des bords

Le processus ci-dessus n'est cependant pas suffisant pour que soient éliminés l'oxyde et les autres impuretés telles que les matières grasses qui souilleraient déjà les pièces avant leur soudage. Il faut donc commencer par un dégraissage au moyen d'un solvant chloré tel que le trichloréthylène (ventilation !) en prenant bien soin de ne commencer le soudage qu'une fois ce solvant complètement évaporé.

Il est ensuite recommandé de procéder à un bon décapage mécanique ou chimique. Le décapage mécanique doit se faire en évitant toute contamination par des particules d'autres métaux et notamment de fer (limaille, meules abrasives ayant servi sur de l'acier).L'emploi de brosses en fil d'acier inoxydable, réservées au travail sur aluminium, est vivement à conseiller.

Le décapage chimique, qui n'est guère applicable d'une façon pratique qu'à des pièces de dimensions réduites, peut s'exécuter par l'une des deux méthodes suivantes :

- immersion à 50 à 70°C pendant 1 à 3 minutes dans une solution de soude caustique à 10%, suivie d'un rinçage à l'eau, puis immersion pendant quelques minutes à température ambiante dans un bain d'acide nitrique à 20% suivie d'un nouveau rinçage, d'un égouttage et d'un séchage à température ambiante (1).

- immersion pendant 20 secondes dans une solution d'acide sulfurique à 6% contenant en outre 4 grammes par litre de fluorure de sodium, suivie d'un séchage à température ambiante.

Dans les deux cas, les récipients de décapage seront en acier inoxydable ou en plastique dur.

d) Préparation des joints

Le procédé TIG peut s'appliquer aux pièces d'aluminium et d'alliages légers ayant de 0,4 à 10 mm d'épaisseur. Il est possible, moyennant l'emploi de méthodes spéciales, d'aller au-delà, mais en général, le procédé MIG (§ 17.13) est alors plus avantageux et surtout beaucoup plus rapide.

Les préparations les plus pratiques et par conséquent les plus recommandables pour les travaux d'atelier sont indiquées aux tableaux

(1) Formule recommandée par la norme française A 87-010 d'avril 1973 (Aluminium et alliages - Soudage - Préparation des bords), dont s'inspirent également nos tableaux 20 et 21.

20 (soudures bout à bout) et 21 (soudures d'angle et par recouvrement) en fonction de l'épaisseur, du positionnement et des possibilités d'exécution. Le bridage mentionné dans la dernière colonne de ces tableaux permet de supprimer tout ou partie du pointage. Il est particulièrement utilisé en soudage automatique. Les montages doivent être exécutés en acier inoxydable.

TABLEAU 20

Préparation des soudures TIG bout à bout sur aluminium et alliages légers

<table>
<tr><th>Position de soudage</th><th>Epaisseur mm</th><th>Métal d'app.</th><th>Préparation</th><th>Remarques sur l'exécution</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Toutes</td><td>0,4 - 1,5</td><td rowspan="2">sans</td><td>Bords relevés non subsistants</td><td rowspan="2">Pointage ou bridage</td></tr>
<tr><td>0,4 - 3</td><td>Bords relevés subsistants</td></tr>
<tr><td></td><td>1,5 - 5</td><td rowspan="11">avec métal d'apport</td><td rowspan="2">Bords droits, arêtes inf.abattues sur 1/4 de l'épaisseur</td><td>Pointage. Reprise envers</td></tr>
<tr><td>A plat</td><td>0,6 - 5</td><td>Bridage recommandé</td></tr>
<tr><td>Toutes sauf en corniche</td><td>4 - 10</td><td>V 70 à 90° avec carre (1). Arêtes inf.abattues sur 1 à 2 mm</td><td>Pointage</td></tr>
<tr><td>A plat</td><td rowspan="2">6 - 10</td><td rowspan="2">X 80 à 90° avec carre de 1,5 à 2 mm</td><td>Soudage envers après retournement et gougeage</td></tr>
<tr><td>Verticale montante</td><td>Soudage à deux opérateurs recommandé</td></tr>
<tr><td rowspan="2">En corniche</td><td>4 - 10</td><td>V non symétrique (fig. 6.41 p. 90) mais avec carre de 1,5 à 2,5 mm et arêtes opposées abattues sur 0,5 mm</td><td>Pointage Reprise à l'envers</td></tr>
<tr><td>6 - 10</td><td>Chanfrein non symétrique comme ci-dessus mais en X avec carre comme ci-dessus</td><td>Pointage. Soudage sur une face. Gougeage. Soudage de la 2è face.</td></tr>
</table>

(1) Voir tableau 6 page 63

TABLEAU 21

Préparation des soudures TIG d'angle et par recouvrement sur aluminium et alliages légers

Disposition et position de soudage	Epaisseur mm	Métal d'app.	Préparation	Remarque sur l'exécution
Angle droit extérieur Toutes positions	0,4 - 3	sans	Bords relevés subsistants ou non	Pointage ou bridage
	1,5 - 5	Avec métal d'apport	Bords droits se touchant par leur arête	Cornière en inox comme support provisoire intérieur de l'angle. Pointage ou bridage.
Angle droit intérieur (Soud.en T) Soud.d'un seul côté Toutes pos.	1,5 - 5		Aucune	Bords libres pointés
	5 - 10		Chanfrein à 60° de l'âme du T avec carre de 3mm	Préchauffer du côté opposé à la soudure
Angle droit intérieur (Soud.en T) Soud.2 côtés altern.ou simultan. Toutes pos.	2 - 6		Aucune	Pointage ou bridage
	Plus de 6		Chanfrein en K à 60° avec carre de 3 à 5 mm	Pointage
Recouvrement Soud. d'un seul côté. Toutes pos.	0,6 - 3		Aucune	Bridage en montage
	Plus de 3		Arête inf. de la tôle couvrante abattue	Pointage
Recouvrement Soud. de 2 côtés alternativement Toutes pos.	Plus de 8		Arêtes intérieures abattues	

e) Métal d'apport

Le tableau 22 ci-après indique le métal d'apport dont l'emploi est généralement conseillé en fonction du métal de base.

TABLEAU 22

Métal d'apport pour soudage TIG de l'aluminium et des alliages légers

Métal de base	Symbole (1)	Métal d'apport.	Symbole (1)
Aluminium pur	1050A (A5)	Aluminium pur	1050A (A5)
Aluminium-mangan.	3033 (A-M1)	Aluminium-mangan.	3033 (A-M1)
Aluminium-	5052	Aluminium-	5083
magnésium	5754 (A-G3M)	magnésium 4-5%	"
"	5086 (A-G4MC)		"
"	5083		"
Aluminium-magné-	6181 (A-SG)	Aluminium-	(A-S4G)
sium-silicium	6081 (A-SGM 0,3)	5% silicium	"
(2)	6061	"	"
Aluminium-	2117 (A-U2G)	Aluminium-	(A-S10 G)
cuivre	2017A(A-U4G)	10% silicium	"
(2)	2024 (A-U4G1)		"

f) Exécution des joints

- Dépassement de l'électrode : il varie de 2 - 3 mm pour les soudures accessibles jusqu'à 6 - 8 mm pour celles qui le sont moins, telles que les soudures en angle intérieur. Les torches munies d'un diffuseur ou lentille (*fig.17.5*, repère 4) permettent un dépassement plus grand, pouvant aller jusqu'à 30 mm.

- Amorçage de l'arc en courant alternatif avec stabilisateur d'arc : il y a intérêt pour empêcher toute contamination réciproque de la pièce et de l'électrode en tungstène, à éviter l'amorçage par contact de l'électrode avec la pièce. Pour ce faire, on incline fortement la torche sur la surface de la pièce en l'appuyant par le bord de la buse à gaz (*fig.17.9.A*). Dès que l'arc a jailli,on redresse la torche dans sa position normale de soudage (*fig.17.9.B*).

- Pointage : le pointage éventuel (son alternative étant le bridage au moyen d'un montage) doit se faire avec soin. Les points, parfaitement pénétrés, seront espacés d'environ 20 fois l'épaisseur des pièces. Pour obtenir des points convenables, il est utile de donner à la torche de petits mouvements circulaires. Après pointage, on procédera à un planage des pièces.

(1) Les symboles non placés entre parenthèses sont ceux de la normalisation française NFA 50-451 de septembre 1973, les symboles entre parenthèses ceux de la NFA 57-702 de septembre 1969.

(2) Alliages à traitement thermique. Leur soudage au moyen des métaux d'apport indiqués et surtout avec l'A-S10 G, peut être assimilé à un soudobrasage.

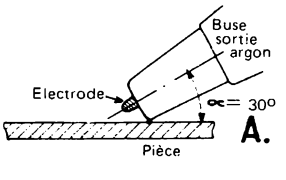


Fig.17.9

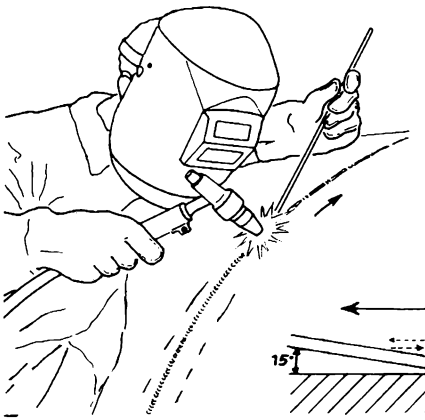


Fig.17.10

- Soudage à un seul opérateur : c'est la technique la plus courante.

Soudage bout à bout, à plat : sans métal d'apport, on déplace la torche, inclinée de 75° sur la surface, dans la direction de cette inclinaison, c'est-à-dire, pour un soudeur droitier tenant la torche de la main droite, de droite à gauche (1) et sans aucun mouvement latéral. C'est la méthode dite "en avant". Avec métal d'apport, même inclinaison et même direction, la baguette de ce métal étant fortement inclinée (15°) sur la surface. La baguette précède donc la torche (*fig.17.10*) et son extrémité est tenue à ± 25 mm de l'arc ; on dépose le métal goutte à goutte en retirant chaque fois la torche légèrement en arrière pour ne pas amener la baguette dans l'arc.

Soudage bout à bout vertical en montant : baguette au-dessus, inclinée à 20°, torche en-dessous, inclinée de 45 à 50°.

Soudage en angle intérieur : comme en soudage bout à bout à plat, mais dans le plan bissecteur de l'angle.

Soudage par recouvrement : idem, mais l'arc étant dirigé un peu plus vers la tôle couverte.

Les paramètres d'exécution pour le soudage bout à bout à plat et pour le soudage en angle intérieur sont donnés à titre de *guide* dans le tableau 23.

- Soudage à deux opérateurs, en montant, sur tôles verticales : les méthodes basées sur le soudage simultané par deux soudeurs, un de chaque côté des pièces, sont directement calquées sur les méthodes dites "montantes B et C" mises au point pour le procédé de soudage oxyacétylénique. Dans la méthode B, qui s'applique de 6 à 10 mm, les bords sont droits et écartés de la moitié de l'épaisseur. Dans la méthode C, qui s'applique, mais plus rarement, aux

(1) L'inverse évidemment pour un soudeur gaucher, pour lequel la baguette précède également la torche.

TABLEAU 23

Paramètres d'exécution pour le soudage TIG de l'aluminium et des alliages légers. Soudage à plat (1) à un seul opérateur. Bout à bout (2).

Epaisseur mm	1	2	3	4	5	6	8
Ø Electrode	1à2	1,6à2,5	2,5à3,2	3à3,5	3,2à4	4à4,8	4,8à6,4
Ø métal d'apport	sans	2	2,5à3	3à3,2	3,2à4,2	4à4,8	4,8à6,4
Argon lit/min.	4à6	4à7	4à8	6à9	6à10	6à10	8à12
Intensité ampères (3)	40à65	80à105	115à145	155à185	190à225	230à265	300à350
Vitesse cm/min. par passe (4)	14	14	11	10	9	9	6

(1) Pour les autres positions, l'intensité peut être réduite de 15%.

(2) Pour les soudures d'angle, l'intensité peut être augmentée de ±25% pour les faibles épaisseurs, de 10 à 15% pour les fortes.

(3) Les chiffres inférieurs sont valables pour le soudage de petites pièces, les chiffres supérieurs pour celui de pièces de moyennes et grandes dimensions.

(4) Pour un facteur de marche de 70%.

pièces de 12 à 15 mm, on opère sur chanfrein en X . Dans les deux méthodes, les torches sont inclinées à 60° vers le haut, les baguettes à 60° vers le bas. Les baguettes, qui précèdent les torches comme en soudage à plat, se trouvent donc au-dessus et les torches en-dessous. Ces méthodes particulièrement économiques nécessitent cependant la formation d'une équipe de deux soudeurs entraînés à avancer exactement à la même vitesse.

17.7. Technique du soudage TIG des aciers inoxydables

Nous renvoyons, pour ce qui concerne les propriétés de ces matériaux et leur comportement aux §§ 11.4 et 11.5.

a) Gaz de protection utilisé

L'argon pur est d'un emploi généralisé en Europe. Des mélanges argon-hélium sont cependant utilisés en soudage automatique. Enfin, des mélanges d'argon avec 5 à 20% d'hydrogène sont préconisés pour le soudage automatique des faibles épaisseurs et pour celui des pas-

ses de fond. Ils permettent d'augmenter la vitesse de soudage d'environ 10%.

b) Choix du courant

Le courant à utiliser est toujours du courant continu en polarité directe c'est-à-dire l'électrode au pôle négatif. L'appareillage le plus fréquemment employé est le transformateur-redresseur.

c) Nettoyage des bords

Les feuilles d'acier inoxydable étant parfois recouvertes de papier ou de plastique doivent être soigneusement débarrassées de ces revêtements. Ensuite, un brossage énergique des bords suffit habituellement, à condition qu'il se fasse à l'aide d'une brosse en fils d'acier inoxydable afin d'éviter toute contamination par des particules de fer ou de rouille. Le métal d'apport doit avoir également sa surface bien à vif.

d) Métal d'apport

Celui-ci doit avoir en principe la même composition que celle des pièces à souder.

e) Protection de l'envers

L'envers du joint n'est pas protégé par l'argon et a une tendance à présenter un aspect rocheux dû à une oxydation. Pour éviter cet inconvénient, il faut, soit souder sur un support en cuivre, soit protéger l'envers de la soudure par un mélange gazeux réducteur, ce qui est particulièrement facile lorsqu'il s'agit de tuyauteries, à l'intérieur desquelles on fait circuler un tel mélange. Ce dernier peut être constitué par 80% d'azote et 20% d'hydrogène. Pour les faibles épaisseurs (0,5 à 2 mm) on utilise de préférence un mélange de 85% d'argon et 15% d'hydrogène.

f) Préparation des joints

Pour le soudage bout à bout et d'une façon générale, les bords sont laissés droits et sans écartement jusqu'à 2 à 3 mm d'épaisseur. De 4 à 8 mm on chanfreine à 90° en laissant une carre de 2 mm, également sans écartement des bords.

g) Exécution des joints

Conformément au § 17.5,h), nous renvoyons aux tableaux de paramètres fournis par le constructeur de l'appareillage utilisé.

h) Traitement des soudures

Tout ce que nous avons dit au § 11.5 au sujet du traitement éventuel des soudures d'acier inoxydable exécutées au moyen d'électrodes enrobées est également valable pour les soudures exécutées par le procédé TIG.

17.8. Technique du soudage TIG du cuivre

Le soudage du cuivre par le procédé TIG se développe actuellement au détriment du soudage oxyacétylénique car son apprentissage est plus facile.

a) Gaz de protection

En Europe, l'argon pur est pratiquement le seul gaz utilisé.

b) Choix du courant

Courant continu en polarité directe (électrode au pôle négatif)

c) Nettoyage des bords

Un simple brossage est habituellement suffisant.

d) Métal d'apport

On se sert de cuivre pur.

e) Préparation des joints

Jusqu'à 4 mm d'épaisseur, les bords sont laissés droits et sans écartement, sauf 1 mm pour les tôles de 4 mm.

De 4 à 8 mm, si l'on opère comme il est indiqué en f), les bords restent également droits et sont écartés d'environ la moitié de l'épaisseur. Nous laisserons de côté les épaisseurs plus fortes, pour lesquelles le procédé MIG (§ 17.18) est le plus souvent préféré.

f) Exécution des joints

Jusqu'à 4 mm, il est recommandé d'opérer par soudage vertical en montant. La torche est dirigée vers le haut, inclinée à 45° sur la verticale, la baguette de métal d'apport maintenue au-dessus est inclinée à 20° sur celle-ci. Cette baguette, ainsi que l'envers du joint, sont enduits du flux décapant utilisé pour le soudage oxyacétylénique du cuivre (1).

De 4 à 8 mm d'épaisseur, si l'on peut disposer d'une équipe de deux soudeurs entraînés à cet effet, il y a intérêt à procéder également par soudage montant simultanément sur les deux faces. La baguette de métal d'apport doit être enduite de flux comme ci-dessus.

17.9. Technique du soudage TIG du nickel et de ses alliages

On se reportera au § 13.3 pour ce qui concerne les propriétés

(1) On remarquera que cet emploi de flux décapant constitue une dérogation au principe de la suppression de tout flux solide ou liquide en soudage sous protection gazeuse.

et la classification de ces matériaux.

Au cours des dernières années, c'est surtout le procédé TIG qui s'est développé pour leur soudage, et la liste des nuances auxquelles il s'applique est importante. Nous l'indiquons ci-après, en même temps que les nuances de métal d'apport à utiliser à partir de 2 à 3 mm d'épaisseur (en-dessous, soudage sans métal d'apport).

Matériau de base	Métal d'apport
Alliages sans traitement thermique	
Nickel 200 et 201	Nickel 61
Monel 400	Monel 60
Monel 404	
Inconel 600	Inconel 62 ou 82
Inconel 625	Inconel 625
Nimonic 75 (AFNOR NC20T)	Nickel-chrome 80-20
Nimonic PE13 (id. NC22 FeD)	Nimonic PE13
Alliages à traitement thermique	
Monel K500	Monel 64
Inconel 718	Inconel 718
Inconel X-750	Inconel 69
Nimonic 80A (AFNOR NC20 TA)	Nickel-chrome 80-20
Nimonic 90 (id. NC20 KT At)	Nimonic 90
Nimonic 263 (id. NCK 20D)	Nimonic 263
Nimonic PE16 (id. NW 11 AC)	Nimonic PE16
Nimonic PK33 (id. NC19 K Du/v)	Nimonic PK33

a) Etat des matériaux à souder

Les alliages sans traitement thermique doivent être commandés à l'état recuit. En cas de formage à froid important, ils seront recuits avant soudage.

Les alliages à traitement thermique doivent avoir subi un traitement de mise en solution (recuit avec refroidissement rapide) puis un traitement de durcissement par vieillissement ; ce dernier peut se faire après le soudage.

b) Gaz de protection

Le plus courant est l'argon pur. Cependant, un mélange d'argon avec au maximum 6 à 7% d'hydrogène est préconisé pour le Nickel 200 et le Monel 400 car il permet de diminuer la porosité et d'augmenter la vitesse de soudage. L'emploi de l'hélium permet également cette augmentation.

La protection gazeuse est très importante et doit être parfaitement contrôlée. Toute contamination par des courants d'air peut provoquer de la porosité. Il faut donc se servir d'une buse de grand

diamètre munie d'une lentille ou diffuseur, et la maintenir aussi près que possible de la pièce. Cette buse sera déplacée perpendiculairement à la surface de la pièce, toute inclinaison importante risquant de créer une certaine aspiration conduisant à la contamination du gaz protecteur.

c) Electrode en tungstène

L'emploi d'électrodes thoriées est recommandable. L'électrode dépassera aussi peu que possible de la buse (0,5 à 0,8 mm pour le soudage sans métal d'apport, 6 à 12 mm pour les soudures d'angle). En cas de contamination, nettoyer et retailler l'électrode.

d) Choix du courant

On peut employer l'alternatif comme le continu, mais ce dernier est en général préféré, l'électrode étant raccordée au pôle négatif. L'amorçage de l'arc est facilité par la superposition d'un courant à haute fréquence.

e) Nettoyage des bords

Ce nettoyage doit être très soigné et s'étendre à 25 mm de part et d'autre du joint : brossage à la brosse en fils d'acier inoxydable, dégraissage au trichloréthylène et même meulage au cas où la surface serait noircie par la présence de soufre.

f) Préparation des bords

Ceux-ci sont laissés droits jusqu'à 3,25 mm d'épaisseur, avec un écartement nul ou très faible. Au-delà, on chanfreinera en V à 75° avec une carre de 0,8 mm et un écartement de 1,5 mm.

g) Exécution de la soudure

On se basera sur les tableaux de paramètres fournis, soit par le constructeur de l'appareillage utilisé, soit par le producteur de l'alliage.

La protection de l'envers des soudures, pour les mêmes raisons que pour l'acier inoxydable, peut se faire au moyen d'un mélange argon 95% - hydrogène 5% .

17.10. Technique du soudage TIG du titane

Le titane est un métal relativement léger (densité 4,5 soit 1,5 fois celle de l'aluminium) dont le point de fusion est de 1660°C, c'est-à-dire notablement supérieur à celui du fer. Sa légèreté relative, ses propriétés mécaniques à l'état recuit voisines de celles de l'acier doux mais pouvant atteindre, pour certains alliages, 1200N/mm^2 * après traitement thermique, sa bonne résistance à la corrosion surtout à chaud, ont favorisé le développement de son emploi dans les industries chimiques, aéronautiques et spatiales.

Toutefois, à une température approchant son point de fusion, il absorbe facilement l'oxygène et l'azote et devient alors extrêmement fragile. Aussi, son emploi dans les fabrications soudées n'a pu se réaliser que grâce au soudage sous argon (1).

La technique à utiliser est très spéciale. Elle consiste, soit à se servir de torches à grand débit munies ou suivies de traînards qui débitent de l'argon sur une large zone en arrière du joint, soit à utiliser des enceintes fermées à parois en plastique transparent, dites "boîtes à gants", munies d'ouvertures pour le passage des bras, enceintes qui sont complètement remplies d'argon et qui contiennent les pièces à souder et la torche.

Les pièces les plus courantes dépassent rarement 3 mm d'épaisseur. Elles doivent être particulièrement bien nettoyées et dégraissées aux abords du joint. Les bords sont laissés droits avec un très léger écartement. On se basera,pour les paramètres de soudage, sur les tableaux fournis,soit par le constructeur de l'appareillage utilisé, soit par le producteur du titane.

17.11. Technique des rechargements anti-usure par le procédé TIG

Nous renvoyons au § 12.1 pour l'intérêt et la description générale des rechargements anti-usure.

L'application du procédé TIG à cette technique présente les avantages suivants par rapport à l'emploi d'électrodes enrobées, se rapprochant ainsi des rechargements exécutés au chalumeau :

a) grâce à la protection gazeuse, la qualité et l'aspect du dépôt sont généralement meilleurs ;
b) le mélange du métal de base et du métal déposé se produit moins qu'en soudage aux électrodes enrobées, le métal déposé a donc une composition plus régulière.

On emploie le plus souvent le courant alternatif, son intensité étant surtout fonction de la *masse* de la pièce sans toutefois dépasser 250 A. Si cette masse est importante, on peut préchauffer la pièce au chalumeau oxyacétylénique ou oxypropane.

17.12. Soudage TIG par points

Ce procédé consiste à exécuter, sans métal d'apport, au moyen d'une torche spécialement appropriée dénommée *pistolet*, des points de soudure localisés entre deux pièces superposées.

(1) Ainsi qu'au soudage sous vide par bombardement électronique (v. chap. 19). Le brasage est cependant également applicable.

L'électrode étant alors en retrait par rapport à l'extrémité de la buse, on appuie celle-ci sur la pièce à l'endroit où le point doit être exécuté. Il se forme un bain de fusion circulaire et, au moment où celui-ci commence à pénétrer la pièce couverte, le courant est progressivement réduit et coupé au moyen d'un dispositif temporisateur automatique.

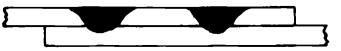


Fig.17.11

On obtient ainsi une soudure entre les deux pièces (*fig.17.11*) et dont la résistance au cisaillement est analogue à celle d'une soudure par points exécutée par soudage par résistance.

Le soudage TIG par points nécessite du courant continu avec pilote haute fréquence. Il s'applique aux aciers non alliés, faiblement alliés et inoxydables jusqu'à une épaisseur de 1,8 mm pour la pièce couvrante, ainsi qu'au nickel et à ses alliages et enfin au titane. Suivant le métal à souder,on utilise de l'argon pur, des mélanges argon-hydrogène, de l'hélium ou des mélanges hélium-argon.

Sensiblement moins rapide que le soudage par résistance, le procédé présente par contre l'avantage de n'exiger l'accessibilité des pièces que *d'un seul côté*. Il permet d'assembler par recouvrement des tôles d'épaisseurs nettement différentes, des tôles sur des profilés ou des membrures, caissons et raidisseurs, enfin de pointer les tôles minces avant soudage. Un sabot spécial adaptable à certaines torches permet également l'assemblage des fers à béton.

17.13.Le procédé MIG

Champ d'application

Ce procédé, dont le principe de base a été décrit § 17.2.b et schématisé par la *fig.17.3*, a pris à l'heure actuelle, surtout grâce aux vitesses élevées qu'il permet d'atteindre, une très grande extension, notamment pour le soudage automatique des aciers non alliés et alliés (en particulier inoxydables), de l'aluminium et de ses alliages, enfin du cuivre. Bien entendu, son champ d'application préférentiel s'étend aux épaisseurs moyennes et fortes, c'est-à-dire celles qui nécessitent l'emploi d'un métal d'apport.

Courant à utiliser

On emploie uniquement le courant continu en polarité inversée c'est-à-dire le fil d'apport-électrode étant raccordé au pôle + .

Différents modes de transfert du métal

Ils sont au nombre de trois et dépendent essentiellement de la densité du courant circulant dans le fil d'apport, mais aussi de la composition du gaz protecteur.

a) Le transfert par projection ou pulvérisation ("spray arc", dit aussi "régime classique") : Ce transfert a lieu par une succession de petites gouttelettes qui *traversent l'arc* comme le montre la *fig. 17.12*. Les tensions d'arc et les intensités de courant, et par conséquent la puissance calorifique, sont relativement élevées et généralement réservées au soudage des moyennes et fortes épaisseurs.

b) Le transfert par courts-circuits successifs ("short arc" c'est-à-dire à arc court) : Dans cette variante, qui utilise des tensions et des intensités faibles et par conséquent une faible puissance calorifique, et qui s'appliques aux faibles épaisseurs, aux soudures sur paroi verticale ainsi qu'aux passes de fond des soudures sur chanfrein, on règle la vitesse d'avancement du fil de manière que la vitesse de fusion du fil soit inférieure à sa vitesse de descente dans le bain de soudure. L'arc se trouve ainsi continuellement raccourci jusqu'à ce que se produise un court-circuit provoqué par le contact du fil-électrode avec la pièce. Il se produit ainsi 50 à 200 courts-circuits par seconde, et l'arc s'interrompt à chaque court-circuit. Le métal n'est donc *pas transporté à travers l'arc*. Les différentes phases du processus sont représentées *fig.17.13*.

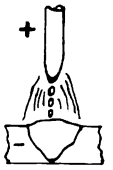


Fig.17.12

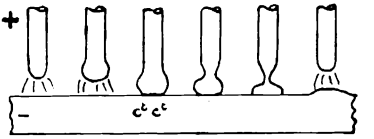


Fig.17.13

c) Le transfert globulaire ("semi-short arc") : C'est un processus intermédiaire. Le métal est transféré par grosses gouttes, d'un diamètre souvent supérieur à celui du fil-électrode.

D'une façon générale, on peut définir suivant le tableau 24 les zones d'utilisation des trois types de transfert en fonction du diamètre du fil d'apport, dans le cas de l'emploi de l'argon.

TABLEAU 24

Diamètre du fil électrode	Transfert par projection		Transfert globulaire		Transfert par courts-circuits	
mm	Volts	Amp.	Volts	Amp.	Volts	Amp.
0,6	-	-	17-18	60-80	13-16	40-70
0,8	23-25	140-180	18-20	110-150	15-18	50-130
1	24-26	180-240	18-22	130-200	16-19	70-160
1,2	25-28	220-300	19-23	180-250	17-21	150-210
1,6	26-28	280-400	-	-	-	-

Pour un fil de composition et de diamètre donnés, ainsi que pour un gaz déterminé, il existe un seuil d'intensité de courant à partir duquel on passe du transfert globulaire à celui par projection, toujours préférable. On a cependant mis au point un procédé dit à "*arc pulsé*" qui permet d'abaisser ce seuil. Il consiste à su-

perposer au courant de base, relativement faible, permettant le maintien de l'arc, des pulsations d'un courant plus intense qui assurent le transfert du métal par projection. Ce procédé nécessite des sources de courant spécialement conçues pour assurer ces conditions.

Choix du gaz protecteur

Nous indiquerons aux §§ suivants, traitant de chaque catégorie de métal à souder, le gaz de protection recommandé.

Avantages particuliers du procédé MIG

Les avantages globaux du soudage sous protection gazeuse ont été exposés au § 17.3.

Le procédé MIG apparaît comme une simplification du procédé TIG avec métal d'apport puisqu'il n'y a plus d'électrode (en tungstène) et de métal d'apport séparé mais que le métal d'apport lui-même, comme en soudage classique, constitue l'électrode. Le rendement de chauffage du bain de fusion et la pénétration se trouvent ainsi améliorés, ce qui permet l'emploi d'intensités et par suite de vitesses d'avancement plus élevées ainsi que l'extension économique du procédé au soudage d'épaisseurs plus fortes.

Quant à la suppression de l'électrode en tungstène (laquelle nécessite l'emploi exclusif d'un gaz inerte), elle permet encore une plus grande souplesse dans le choix du gaz protecteur : c'est ainsi que pour les aciers non alliés ou faiblement alliés, l'argon ou les mélanges argon-hélium, expérimentés en premier lieu, se sont avérés trop coûteux pour que le procédé MIG puisse concurrencer le soudage aux électrodes enrobées. On en est venu alors, pour ces aciers, à l'emploi de l'anhydride carbonique CO_2 ou de mélanges CO_2-argon grâce auxquels, comme nous le verrons plus loin, le problème a été résolu et le champ d'application du procédé MIG considérablement étendu.

Relation entre les principaux paramètres géométriques et mécaniques

(voir § 17.5.h)

Si P = poids de métal à déposer par passe, en grammes
p = poids du fil par mètre, en grammes (1)
V = vitesse d'avancement de la torche, par passe, en cm/min.
v = vitesse de déroulement du fil en *mètres* par minute,

(1) Ce poids est généralement indiqué par le fournisseur ; si ce n'est pas le cas, on peut le calculer par la formule $p = 0{,}785\ d^2 m$, *d étant le diamètre du fil en mm et m le poids spécifique du métal exprimé en kg par* dm^3 .

$$\text{on a la relation } v = \frac{PV}{100\ p}$$

Exemple : P = 300 grammes
p = 9 grammes
V = 30 cm par minute

$$\text{on trouve } v = \frac{300 \times 30}{900} = 10 \text{ mètres par minute.}$$

Cette relation peut servir de guide ; elle n'est évidemment pas rigoureuse, car elle ne tient pas compte des pertes pouvant se produire au cours du transfert du métal de l'électrode à la soudure.

17.14. L'APPAREILLAGE DU PROCÉDÉ MIG

a) Les bouteilles de gaz et leur détendeur

Pour ce qui concerne l'argon et les mélanges riches en argon, on se reportera au § 17.5.a).

Quant au CO_2, il est également livré en bouteilles d'acier, à l'état partiellement liquéfié sous une pression de 65 bars (à la température ordinaire). Il est détendu au moyen d'un appareillage analogue à celui décrit au même paragraphe. Afin d'éviter toute obstruction du détendeur par congélation, on doit mettre deux ou plusieurs bouteilles en batterie ou encore intercaler entre la bouteille et le détendeur un réchauffeur électrique.

b) La torche

Plusieurs modèles de torches MIG existent sur le marché : les unes comportent un manche pourvu d'un interrupteur de commande (*fig. 17.14* A), les autres une poignée et une gâchette qui leur valent la dénomination de *pistolet*. Celui représenté *fig.17.14*B spécial pour travaux légers et utilisant un fil de seulement 0,8 mm, comporte un carter qui contient la bobine de ce fil.

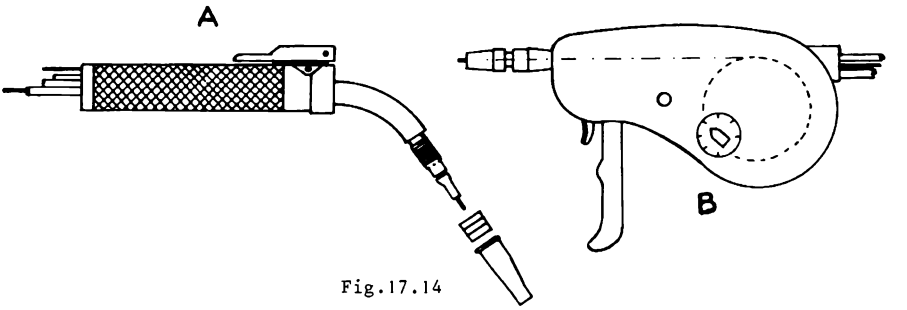


Fig.17.14

c) La source de courant

Dans le cas le plus fréquent où l'on dispose de courant alternatif, il faut utiliser un redresseur ou un groupe dont les principes ont été décrits au § 2.8, mais dont les caractéristiques doivent être spécialement appropriées au procédé MIG (1) et dont la puissance doit bien entendu correspondre à l'importance des travaux envisagés. Leur tension à vide doit être réglable de 15 à 35 volts environ.

Pour la technique de transfert par courts-circuits successifs, le poste doit comporter une inductance * réglable permettant de faire varier la fréquence des courts-circuits, soit en plus (diminution du temps d'arc et de l'énergie développée) soit en moins (augmentation de ces facteurs).

Dans le cas du transfert par projection, une augmentation de l'inductance assure une montée plus lente du courant de soudage.

d) Le coffret-dévidoir

Un tel coffret se présente, à titre d'exemple suivant la *fig. 17.15* , sous la forme d'un ensemble, souvent fixé sur une plate-forme tournante, et comportant un moteur de commande 1 accouplé à un réducteur de vitesse 2, un dispositif 3 à serrage réglable actionnant les galets d'entraînement du fil-électrode 4, enfin le coffret de commande proprement dit 5. Celui-ci porte différents interrupteurs de courant et de débit de gaz. La bobine dévidoir 7 porte le rouleau de fil. Le câble de soudage est raccordé en 8, le conducteur auxiliaire pour la commande de l'interrupteur de la torche en 9 et le tuyau d'amenée du gaz depuis le coffret jusqu'à la torche, en 10 (2).

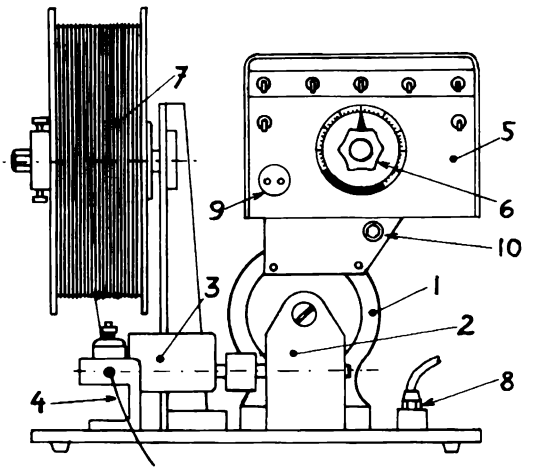


Fig. 17.15

e) Automatisation du procédé MIG

(1) En particulier, la source de courant doit être à tension constante c'est-à-dire que la courbe caractéristique volts-ampères (voir § 2.2) doit être très peu plongeante.

(2) Les amenées de courant et de gaz au coffret-dévidoir ne sont pas représentées sur le dessin.

Ce que nous avons dit de l'automatisation du procédé TIG (§ 17.5.g) peut se répéter pour le procédé MIG.

17.15. Technique du soudage MIG de l'aluminium et des alliages légers

a) Gaz de protection

Comme pour le procédé TIG (§17.6.a).

b) Nettoyage et décapage des bords

Comme pour le procédé TIG (§ 17.6.c). Ajoutons cependant que dans le cas des soudures en plusieurs passes,il est nécessaire de brosser la surface du cordon après chaque passe.

c) Préparation des joints

En général, le procédé MIG s'applique aux pièces d'aluminium et d'alliages légers ayant au moins 3 mm d'épaisseur (en-dessous, on choisit le procédé TIG). Les soudures bout à bout et en angle intérieur s'exécutent sur support non subsistant en métal identique au métal de base. Les supports non subsistants comporteront une gorge ou un évidement destinés à éviter l'effondrement du bain de fusion et à mouler correctement la racine de la soudure.

Pour le reste, on peut se baser sur les tableaux 25 et 26 ci-après, inspirés de la norme AFNOR A 87-010, et qui se rapportent aux cas les plus fréquents et indiquent les préparations les plus faciles à réaliser en atelier.

d) Métal d'apport

L'aluminium commercialement pur se soude avec un fil d'aluminium non allié, tandis qu'un fil d'alliage est utilisé pour le soudage autogène d'un alliage ainsi que pour le soudage d'un alliage avec de l'aluminium commercialement pur.

Le tableau 27 donne des indications plus précises à ce sujet sur base des spécifications françaises.

e) Exécution des soudures

En principe,on doit éviter de grands bains de fusion et des surchauffes locales. C'est pourquoi on procédera de préférence par passes tirées et étroites (*fig.6.3*) permettant un refroidissement et une solidification rapides, pour la première passe et en général pour toutes les soudures bout à bout.

Pour les passes suivantes et la passe de finition, on peut procéder par passe balancée (*fig.6.4*) . Enfin, pour les soudures en angle intérieur, la méthode à pas de pélerin (*fig.8.11*) sera la plus indiquée.

TABLEAU 25

Préparation des soudures MIG bout à bout sur aluminium et alliages légers (e = épaisseur en mm ; d = écartement ; h = hauteur de la carre; s = épaisseur du support ; R.E. = reprise à l'envers recommandée).

	Position de soudage	Epaisseur mm	Support	Préparation	Remarques
Soudage d'un seul côté	Toutes	3 à 6	sans	Bords droits, arêtes infér. abattues	d=1,5 max R.E. pour e > 4 mm
			non subsistant	Bords droits	d=3 max.
			subsistant	Bords droits support plat fixé p.point. ou soud.	s=e+1 max. 6 mm
	Toutes sauf en corniche	6 à 25	sans	V70° h=3 ar.inf.abat.	d=1,5 max. R.E.
			non subsistant	V70° h=3 supp. av.évidement	d=2 max.
	A plat	6 à 20	subsistant	V d'angle α support plat fixé p.soudage ou pointage	α=40° d=6 s≤6
		plus de 20			α=30° d=10
	Verticale	6 à 25		V d'angle α support plat fixé p.soudage ou pointage	α=70° d=3 à 6 h=0
	Plafond				α=70° d=3 à 6 h=1,5 à 3
Soudage des 2 côtés alternativ.	A plat	8 à 30	sans	Bords droits ar.inf.abat. sur 1 mm	d=0 pour e>12 soud. automat.
	Plat et Plafond	> 10		X ; h=1,5 à 3	α=70à90°
	Verticale				α=70°
	En corniche	10 à 20		X dissymétrique (*fig.6.41*) h=2 à 3	α=40et20° R.E.

TABLEAU 26

Préparation des soudures MIG en angle droit intérieur et extérieur sur aluminium et alliages légers
(voir pour légende le tableau 25)

	Position de soudage	Epais. mm	Support	Préparation	Remarques
soudage en angle intérieur (en T)	Toutes soudage d'un côté	> 4	sans	Bords droits	d=2 entre la tranche et le plat
	Toutes soud.2côtés altern.ou simult.(autom.)	> 4		Chanf.en 1/2K α=60° d=1,5 max.	R.E.de l' autre côté gorge=5
		> 8		Chanf.en K α=60° d=1,5 max.	voir *fig.5.7*
Soudage en angle extérieur	Toutes Soudage d'un côté	3à12	sans	Bords droits.Léger recouv.d'une tôle s/l'autre	R.E.
		3à12	non subsistant	Bords droits bien ajustés	sommet de la corn.-support en inox coupé sur 3,5 mm max.
		3à12	subsistant	idem Soud.ou point. du bord inf. de la cornière	
	Toutes. Soudage d'un côté	> 6	sans	Chanf.en V70° h=e/4 à e/3	R.E.
			non subsistant	Chanf.en V70° h=e/4 à e/3	sommet de la corn.-support en inox coupé sur 3,5 mm max.
		6à9,5	subsistant	Chanf.en V40° soud.ou point. du bord inf. de la cornière	α=40° d$\geq$5
		> 9,5			α=50-60° d$\geq$6,5

TABLEAU 27

Métal d'apport pour soudage MIG de l'aluminium et des alliages légers (1)

Alliage de base		Fil d'apport qual. courante. Symbole	Fil d'apport qual. courante ou sup. (2) Symbole.
Aluminium	1200 (A4)	1050A(A5)	1080A(A8)
	1050A(A5)	1050A(A5)	1080A(A8)
	1080 (A8)	1050A(A5)	1080A(A8)
	1199 (A9)	-	1080A(A8)
Al - Mn	3003 (A-M1)	-	1080A(A8)
Al - Mg	5754 (A-G3M)	5754 (A-G3M)	5086 (A-G4MC)
	5086 (AG4MC)	-	5086 (AG4MC)
Al - Si	(A-S5)	(A-S5)	-
	(A-S4G)	(A-S5)	-
Al - Zn	7020 (AZ5G)	(A-G5)	7020 (AZ5G)

(1) Voir renvoi 1 du tableau 22.

(2) Pour travaux de haute qualité, devant notamment subir le contrôle radiographique

TABLEAU 28

Paramètres d'exécution pour le soudage MIG bout à bout à plat de l'aluminium et des alliages légers

Epaisseur mm	2	3	4	5	6	8	10	12	20
Préparation	I	I	I	I	I	V	V	V	X
Ø fil-électrode	0,8	0,8	1,2	1,2	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6 2,4
Tension, volts	19,5	20	21	23	24	25	27	27	27
Intensité, ampères	82	125	170	220	280	250	280	310	310
Argon, lit/minute	13	13	15	16	28	18	20	25	20
Nombre de passes	1	1	1	1	2	2	2	2	4
Vitesse cm/minute par passe	57	66	70	80	90	45	60	45	38
Mode de transfert (1)	cc	cc	cc	cc proj	proj	proj	proj	proj	proj

(1) cc = courts-circuits successifs ; proj = par projection.

L'arc sera réglé de façon à ne pas produire de crépitements, ceux-ci perturbant la veine de gaz de protection. La longueur de l'arc sera maintenue aussi constante que possible.

Sur fortes épaisseurs, le pointage et le départ des cordons seront facilités par un préchauffage.

Enfin, on choisira de préférence le soudage à plat ou en verticale montante.

17.16. Technique du soudage MIG des aciers non alliés ou faiblement alliés

a) Gaz de protection utilisé

L'argon pur n'est jamais utilisé pour le soudage de ces matériaux. Le CO_2 est par contre d'un emploi très général, et il faut remarquer que ce gaz n'est pas un gaz inerte mais bien un gaz oxydant, car il peut, en présence de métaux chauffés à haute température, se décomposer en oxyde de carbone CO et oxygène. Malgré cela, le CO_2 est utilisé avec succès au soudage des aciers non alliés ou faiblement alliés *à condition que* le fil-électrode contienne des éléments désoxydants appropriés, soit dans sa composition même, soit sous forme d'un noyau de flux (fils fourrés, § 3.5).

On emploie également un argon contenant de petites quantités d'oxygène, notamment en soudage automatique : la présence de cet oxygène favorise le transfert du métal de l'électrode à la pièce en très petites gouttelettes (projection) et augmente fortement la vitesse de ce transfert.

Enfin, des mélanges d'argon et de CO_2 avec parfois de petites quantités d'oxygène sont utilisés dans certains cas, ainsi que des mélanges hélium-argon.

D'une façon générale, les mélanges, plus coûteux que le CO_2 pur, favorisent la stabilité de l'arc et la finesse des gouttelettes en transfert par projection, assurent une meilleure visibilité de la soudure (arc plus court, éclaboussures moindres) et permettent d'améliorer les propriétés de la soudure. Ils nécessitent par contre un nettoyage des bords particulièrement soigné.

Le tableau 29 ci-après indique les mélanges les plus courants en fonction de la position du soudage et du mode de transfert du métal ainsi que de l'épaisseur e en mm .

On se reportera au § 17.14.a) pour ce qui concerne les modalités d'emploi des bouteilles de CO_2 .

Le débit du gaz de protection sera au moins égal à 10 à 15*l*/min, pour le transfert par courts-circuits ou globulaire et de 20 à 25*l*/min pour le transfert par projection.

TABLEAU 29

Composition	Transfert par projection	Transfert par courts-circuits successifs
Argon à 1,2 ou 5% d'oxygène	A plat et en corniche	
Argon à 25 ou 50% de CO_2		Toutes positions e = 0,9 à 6,4
CO_2 pur	A plat et en corniche e > 6,4	Toutes positions e = 0,9 à 6,4
Argon à 7% de CO_2	A plat et en corniche e > 1,6	Toutes positions (arc pulsé) e > 1,6

b) Préparation des joints

Voir tableau 30 ci-après.

c) Métal d'apport

Le choix du fil d'apport dépend d'une part de la qualité et de l'état de surface des pièces à souder et, d'autre part, de la nuance de l'acier de base, telle que nous l'avons définie aux §§ 11.1 à 3.

Si l'on a affaire à des aciers de qualité très ordinaire qui sont généralement *effervescents* c'est-à-dire non calmés (voir § 11.1.b), ou bien encore à des tôles calaminées c'est-à-dire recouvertes d'oxyde, il est recommandé de se servir de *fils fourrés* (§ 3.5), dont le noyau de flux décapant, en se décomposant, exerce une action d'affinage et forme un laitier friable qui contribue à la protection du métal au cours de son refroidissement, évitant ainsi la formation de porosités.

S'il s'agit d'aciers calmés mais néanmoins recouverts de calamine,on ne pourra utiliser un fil plein que si l'on a procédé à un nettoyage très soigné des tôles, qui devront être bien mises à vif.

Dans les deux cas, le CO_2 pur sera le gaz de protection le plus recommandable.

Quant à la nuance du fil d'apport à choisir, on se basera sur le tableau 31 et éventuellement pour plus de détails, sur les recommandations des fabricants. On veillera également à ce que les bobines de fil soient parfaitement sèches et exemptes d'oxydation superficielle.

TABLEAU 30

Principales préparations pour les soudures MIG sur aciers non alliés ou faiblement alliés (1)

	Joint	e	d	N	Øfil	Régime de transfert
Soudage à plat	Bout à bout Bords droits	1,5à3	0,5à1,5	1	0,8	cts-circuits
	Bout à bout Bords droits	4à6	2	1	1,2	cts-circuits
	V 50°	8à12	3	3	1ère:1,2 2ème:1,2 3ème:1,2	cts-circuits projection projection
	V 60°	> 12	3	> 3	1ère:1,2 2ème:1,2 autres : 1,2 - 1,6	cts-circuits projection projection
	angle droit intérieur	1,5à2	-	⩾ 1	1,2	projection
		3à12	-	⩾ 1	1,6	projection
		12	-	⩾ 1	1,6	projection
Soudage vertical	Bout à bout Bords droits	1,5à4	1à4	1	0,8	↓ cts-cir.
		3à5	2à4	1	1,2	↓ cts-cir.
	Bout à bout V 60°	6à8	4	2	1,2	↓ cts-cir.
		⩾ 10	2à3	> 2	1ère:1,2 aut.:1,2	↓ cts-cir. ↑ cts-cir.
	Angle intérieur	1,5à4	-	1	0,8	↓ cts-cir.
		⩾ 5	-	> 2	1ère:1,2 aut.:1,2	↓ cts-cir. ↑ cts-cir.

(1) en mm : e = épaisseur ; d = écartement des bords ; N = nombre de passes ; ↑ = soudure montante ; ↓ = soudure descendante.

TABLEAU 31

Acier de base	Fil d'apport (Fil plein)
Extra-doux	Acier extra-doux
Doux et demi-doux, effervescent ou semi-calmé	Ac. extra-doux calmé au Ti et à l'Al
Mi-doux et mi-dur Semi-inoxydable (§ 11.3)	Ac. extra-doux faiblement allié au Si-Mn
Faiblement allié, à haute limite élastique *	Ac. faiblement allié au Mn-Mo
Faiblement allié, à très haute limite élastique	Ac. faiblement allié au Mn-Mo-Ni
Faiblement allié au Cr-Mo résistant au fluage * (type Chromesco)	Ac. faiblement allié au Cr-Mo de nuance correspondant à l'acier de base

Pour ce qui concerne les fils fourrés, leur noyau peut être de la classe des enrobages "rutile" ou de celle des enrobages basiques (§ 3.5 p. 47). Seules certaines qualités de fils à flux "rutile" permettent le soudage sur des tôles grasses ou rouillées.

d) Exécution des soudures

Le procédé MIG, généralement automatisé ou semi-automatisé, se caractérise par de grandes vitesses de dépôt et par conséquent d'avancement de la soudure. Le graphique *fig.17.16* valable pour l'acier doux et en régime continu (facteur de marche 100%) donne les valeurs moyennes du poids de métal déposé par heure en fonction de l'intensité du courant et du diamètre du fil d'apport. Pour arriver à une valeur pratique, il faut multiplier ces poids par un facteur de marche qui est au minimum de 70% soit 0,7. Ceci donne, par exemple, pour un fil de 1,2 mm sous 260 A. (en pointillé sur le graphique) : 3,8 × 0,7 = *2,66 kg/heure*. A titre comparatif, en soudage manuel aux électrodes enrobées (§§ 10.2 et 10.4), une électrode de 5 mm, classe 4, fond sous 220 A. en 1,5 minute en déposant 52 g, ce qui correspond à 2,08 kg/heure. Mais en tenant compte du facteur de marche, qui dans ce cas n'est que de 40%, le rendement du dépôt devient 2,08 × 0,4 = *0,832 kg/h.*, soit moins du tiers de l'exemple précédent.

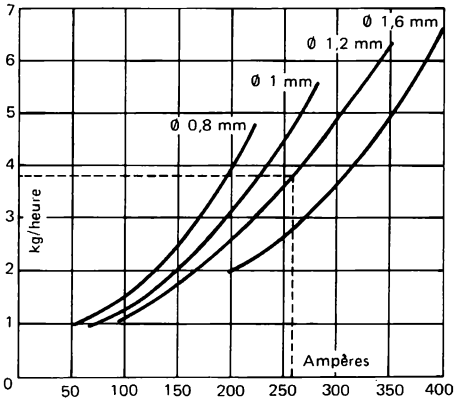


Fig. 17.16

Néanmoins, si l'on veut éviter la présence de porosités dans les cordons de soudure, il faut veiller à bien proportionner l'intensité du courant au diamètre du fil d'apport utilisé, et ne pas augmenter exagérément la vitesse de déroulement du fil. L'arc doit rester doux et sans projection excessive d'éclaboussures.

A cet égard, le réglage de la self-induction * est important car il conditionne l'allure de la fusion c'est-à-dire le mode de transfert du métal : par projection (arc plus chaud), par courts-circuits successifs (arc plus froid).

Quant à la manipulation de la torche (ou du pistolet), la règle générale est de la tenir inclinée à environ 70° sur la surface de la tôle à souder.

Nous ne donnerons pas de tableau des paramètres à observer pour le soudage des aciers non alliés ou faiblement alliés. En effet, ces paramètres dépendent trop largement, pour la plupart, du type d'appareillage utilisé et notamment des caractéristiques de la source d'alimentation en énergie électrique. La diversité de ces sources ne permet pas de tracer des règles générales. En dehors des indications données dans les tableaux 29, 30 et 31 et sur le graphique *fig.17.16* on ne peut donc que se baser sur les recommandations du constructeur.

17.17. Technique du soudage MIG des aciers inoxydables

Pour ce qui concerne les propriétés de ces matériaux et leur comportement au cours du soudage par fusion en général, nous renvoyons aux §§ 11.4 et 11.5.

a) Gaz de protection utilisé

On emploie uniquement des *mélanges* de gaz :
1 : pour le transfert par projection (arc long), toutes positions sauf verticale : argon à 1, 2 ou 5% d'oxygène, le rôle de ce dernier composant étant de maintenir une atmosphère suffisamment oxydante pour empêcher l'augmentation de la teneur en carbone du métal déposé, phénomène généralement défavorable à la bonne tenue de la soudure.
2 : pour le transfert par courts-circuits (arc court), toutes positions y compris verticale mais seulement pour le soudage en une seule passe ou pour la passe de fond : argon à 25 ou 50% de CO_2 ou bien mélanges d'argon, d'hélium et d'hydrogène.

b) Nettoyage et décapage des bords

Comme pour le procédé TIG (§ 17.7.c).

c) Métal d'apport

La composition du fil-électrode doit être très proche de celle du métal de base. Elle comporte souvent un peu plus d'éléments sta-

bilisateurs, tels que Mo, Nb, Ti afin de compenser la perte pouvant se produire au cours du soudage, et un peu moins de carbone, afin de prévenir les risques de carburation.

d) Préparation des joints

En soudage bout à bout, les bords peuvent être *soutenus* sur un support provisoire c'est-à-dire non subsistant, construit en cuivre et comportant une entaille rectangulaire large de 6 à 8 mm facilitant le dégagement de la racine. Dans ce cas, les bords sont laissés droits jusqu'à 4 mm d'épaisseur, sans écartement pour e = 1 mm et avec un écartement égal à la moitié de l'épaisseur pour e = 2 à 4 mm. Au-delà de 5 mm, les bords sont chanfreinés à 70-80° en laissant une carre et un écartement de 1,5 à 2 mm .

Les bords peuvent également être *non soutenus*. Dans ce cas, on soudera :

jusqu'à 3 mm : sur bords droits, écartement égal à la moitié de l'épaisseur ;

de 4 à 10 mm : sur chanfrein à 70-75° avec carre de 3 mm et écartement de 1 à 1,5 mm ;

enfin, au-delà de 7 mm si l'on peut souder sur une face puis sur l'autre, sur chanfrein en X à 75° avec carre de 1,5 à 2 mm et écartement de 0 à 1 mm.

Pour les autres dispositions et positions des soudures, on peut adopter les indications du tableau 30 relatif au soudage MIG des aciers non alliés.

e) Exécution des soudures

Jusqu'à 5 mm: régime arc court (courts-circuits successifs), soudage à plat ou en descendant ;

Au-delà de 5 mm, si l'on peut utiliser des fils de 1,2 ou 1,6 mm : régime arc long (par projection) : soudage à plat et, pour la passe de fond des soudures sur chanfrein, soudage en descendant.

Pour les raisons déjà exposées, nous renvoyons aux tableaux de paramètres fournis parles constructeurs.

17.18. Technique du soudage MIG du cuivre

Le cuivre pur courant, ou cuivre électrolytique, contient presque toujours du protoxyde de cuivre ou *oxydule* réparti sous forme de globules microscopiques à l'intérieur des grains. Lorsqu'un tel cuivre est chauffé jusqu'à fusion, cet oxydule se répartit, au cours du refroidissement, entre les grains de métal, rendant celui-ci très fragile. Cette qualité de cuivre est pratiquement insoudable (1).

(1) Elle peut par contre être brasée (voir L. MENDEL, Manuel Pratique de Soudage aux Gaz et de Coupage thermique. Dunod, édit.

Par contre, le cuivre "désoxydulé" c'est-à-dire exempt d'oxygène peut être soudé par le procédé MIG en utilisant un fil-électrode de la même qualité.

On se sert d'argon pur pour les épaisseurs allant jusqu'à environ 10 mm, et de mélanges hélium-argon (par exemple 70-30) au-delà de cette épaisseur, de tels mélanges permettant d'utiliser des intensités plus élevées et par suite d'obtenir une plus grande vitesse d'avancement.

Le diamètre du fil est de 1,2 à 1,6 mm, il peut cependant atteindre 2,4 mm pour le soudage automatique de cuivre de 10 mm d'épaisseur sous protection de mélange hélium-argon.

Le soudage s'exécute généralement à plat :
jusqu'à 6 mm d'épaisseur : sur bords droits ;
de 6 à 8 mm : sur simple chanfrein à 90° avec carre de 2 mm ;
pour 10 mm : soit sur simple chanfrein à 90°, soit sur chanfrein en X ;
pour 12 mm et plus : sur chanfrein en X .

Il est recommandé de souder sur support en graphite pourvu d'une rainure en cuvette et, à partir de 6 mm d'épaisseur pour le soudage sous argon pur, de préchauffer les pièces de 200° à 600° suivant leur épaisseur.

17.19. Technique du soudage MIG du nickel et de ses alliages

Comme nous l'avons dit au § 17.9, c'est surtout le procédé TIG qui a été utilisé jusqu'ici pour le soudage du nickel et de ses alliages. En effet, en raison du coût élevé de ces matériaux, on les emploie surtout en faibles épaisseurs, et leur soudage TIG sans métal d'apport est alors le plus fréquent.

D'autre part, les alliages suivants repris dans la liste figurant au § 17.9 ne se soudent pas jusqu'à présent par le procédé MIG : Monel 404, Inconel X-750, Nimonic 80A, Nimonic 90, Nimonic PK 33.

Pour les autres matériaux de la liste, la préparation des bords est la même que pour le soudage TIG.

Le choix du gaz en fonction de l'épaisseur et du régime de transfert est en principe le même que dans le cas du cuivre.

L'emploi de ces matériaux étant très spécial, nous recommandons de consulter, pour les problèmes relatifs à leur soudage, les services techniques des sociétés qui les produisent.

CHAPITRE 18

SOUDAGE ET RECHARGEMENT AU PLASMA (1)

18.1. PRINCIPE DU PROCÉDÉ

Celui-ci est issu des recherches effectuées au sujet du soudage TIG sous argon. Par certains côtés, il s'apparente aussi au soudage à l'hydrogène atomique (v. chap. 16).

On appelle *plasma* un état particulier de la matière gazeuse, dans lequel celle-ci n'est plus composée de molécules * ou d'atomes *, mais d'ions * et d'électrons * provenant de la scission de ces derniers. Cet état se présente lorsque le gaz se trouve porté à des températures de l'ordre de *plusieurs milliers* de degrés. Il devient alors un excellent conducteur de l'électricité. Un gaz capable d'acquérir l'état de plasma est qualifié de *plasmagène*.

En général, dans un chalumeau ou une torche plasma, qui est analogue à une torche TIG et dont l'extrémité est schématisée *fig. 18.1*, le courant est amené par une électrode en tungstène E et l'arc jaillit au centre d'une tuyère T en cuivre se terminant par un étranglement. En même temps, on envoie autour de l'électrode un gaz plasmagène tel que de l'argon et celui-ci passe dans l'arc à une vitesse considérable en raison de l'étranglement de la tuyère. A la sortie de celle-ci, le gaz devenu plasma, forme un dard A extrêmement brillant dont la température dépasse 15000°C et dont la concentration d'énergie est très importante. Ce dard permet de fondre très rapidement tous les métaux et même un grand nombre de matières réfractaires, et il possède un grand pouvoir de pénétration en raison de sa longueur et de la rigidité due à sa grande vitesse. Autour de la tuyère est fixée une buse B et dans l'espace annulaire entre ces deux pièces débouche un

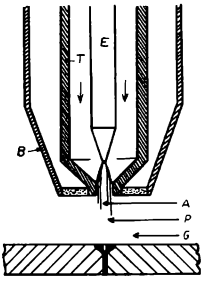


Fig.18.1

(1) Le procédé plasma permet également le découpage des métaux. Cependant, en raison de l'analogie de sa technique avec celle de l'oxycoupage, le découpage au plasma est traité dans le "Manuel Pratique de Soudage aux Gaz et de Coupage Thermique" du même auteur. Dunod, édit.

second flux de gaz inerte constituant autour du dard et de la colonne de plasma P une gaine G qui protège le métal en fusion vis-à-vis de l'air ambiant. Enfin, l'électrode en tungstène et la tuyère sont refroidies par une circulation d'eau, non représentée sur le schéma.

18.2. SOUDAGE AUTOMATIQUE AU PLASMA

Pour les fortes et les moyennes épaisseurs, notons que les grandes vitesses d'avancement du soudage, d'une part, et d'autre part l'encombrement des tuyauteries et câbles raccordés à la torche (deux ou trois arrivées de gaz, arrivée et départ de l'eau de refroidissement, câbles de section relativement forte) font que le procédé se prête médiocrement à une exécution manuelle. Son domaine préférentiel est donc le soudage entièrement automatique.

L'appareillage comprend alors la torche, montée sur un chariot circulant sur rails et qui porte le coffret de commande et le dévidoir ainsi qu'un dispositif tire-fil fixé sur le support de la torche.

Les gaz plasmagènes utilisés sont les suivants :

l'argon pour les aciers doux ou faiblement alliés (e = 1,5 à 6 mm) ainsi que pour le titane et le zirconium (e = 3 à 8 mm)

l'argon ou les mélanges argon-hydrogène pour l'acier inoxydable (e = 1,5 à 7 mm).

Le soudage au plasma permet une grande souplesse dans la distance entre la torche et la pièce à souder, on n'a donc pas à se préoccuper, comme dans le procédé TIG, du maintien de la longueur de l'arc.

Les soudures étant exécutées sans support à l'envers, une protection gazeuse de cet envers est le plus souvent nécessaire pour éviter sa contamination ; on utilise dans ce cas un 3è flux de gaz protecteur.

Le courant utilisé est toujours du courant continu avec électrode au pôle négatif ; l'arc est généralement amorcé au moyen d'un courant haute fréquence (§ 2.5). La gamme des intensités mises en oeuvre s'étend de 80 à 200 A.

L'arc plasma peut être suivant le cas :

a) *transféré*, c'est-à-dire qu'il jaillit entre l'électrode et la pièce à souder, auquel cas cette dernière se trouve dans le circuit électrique ; c'est le système le plus fréquent ;

b) *non-transféré* ou *soufflé*,c'est-à-dire qu'il jaillit entre l'électrode et la tuyère, la pièce à souder n'étant donc pas dans le circuit électrique ; ce système est mieux adapté aux faibles épaisseurs (voir microplasma, § 18.3).

Pour les faibles épaisseurs, variables suivant le métal à souder, on exécute une simple ligne de fusion qui suffit à assurer une pénétration convenable. Pour les épaisseurs moyennes, l'arc traverse le joint et forme un trou qui débouche à l'envers, ce qui permet un contrôle visuel immédiat de la pénétration . Ce trou, constamment maintenu, progresse continuellement au fur et à mesure de l'avancement de la soudure, assurant la formation à l'envers du joint d'un léger bourrelet qui doit être bien lié. La grande puissance de pénétration de l'arc plasma permet d'éviter le chanfreinage des bords jusqu'à une épaisseur relativement importante. A titre d'exemple, les conditions d'exécution d'une soudure d'acier inoxydable bout à bout sur bords droits sont les suivantes :

e(mm)	I(Amp.)	E(Volts)	Vitesse (cm/min.)
1,5	100	26	85
2,5	110	28	44
3	135	30	48
5	150	30	20
7	180	30	17

Le soudage automatique au plasma a été appliqué jusqu'ici principalement au soudage bout à bout des aciers doux non alliés ou faiblement alliés, des aciers inoxydables, du titane et du zirconium ainsi que des alliages cuivre-nickel, dans une gamme d'épaisseurs de 3 à 7 mm, sur bords droits et en une seule passe avec pénétration totale.

Pour ce qui concerne les métaux les plus courants, il faut cependant remarquer que leur soudage automatique ne s'adapte pratiquement qu'aux soudures rectilignes ou circulaires (virole en rotation) exécutées à plat et se présentant, grâce à des montages de positionnement appropriés, de façon que les bords conservent un alignement parfait tout au long de l'opération. Si ce n'est pas le cas, il faut bien recourir au soudage manuel.

18.3. SOUDAGE MANUEL OU MICROPLASMA

Nous laisserons de côté le soudage s'exécutant à la main dans des cas spéciaux pour les matériaux de moyenne et forte épaisseur.

Lorsqu'on a affaire à des pièces très minces et de volume très faible, on peut se servir d'une torche d'un modèle particulièrement léger et de ce fait d'une manipulation facile. L'exécution du soudage reste alors manuelle et le procédé est dénommé "microplasma" (appellation commerciale en France : miniplasma).

L'arc utilisé dans ce cas est le plus souvent l'arc *soufflé* tel que nous l'avons défini au § précédent. Le débit gazeux est faible. Le procédé présente surtout l'avantage de permettre le maintien d'un arc très stable malgré les très faibles intensités mises en jeu : de

23 à 0,3 Amp. Le soudeur se sert alors de l'arc comme d'une flamme ponctuelle c'est-à-dire de très petites dimensions, qui peut fondre même des matériaux *non conducteurs de l'électricité*.

Parmi les métaux auxquels s'applique jusqu'ici le procédé, on peut citer les aciers inoxydables, l'inconel 718, le tantale, le molybdène, le tungstène et certains métaux précieux. Les épaisseurs sont souvent inférieures à 0,5 mm et peuvent descendre jusqu'à 0,01 mm pour l'acier inoxydable.

Le soudage microplasma, dont le développement est assez récent, a déjà permis d'exécuter des travaux difficilement réalisables par d'autres procédés électriques : très petits assemblages en électronique, jonction de fils très fins tels que des thermocouples, fabrication de tubes de manomètres, de thermostats, soudage de fines toiles métalliques, etc...

18.4. Rechargement et projection au plasma

Il serait possible de recharger au moyen d'un alliage anti-usure (§ 12.1) une pièce métallique quelconque en se servant d'une installation de soudage manuel ou automatique comme celle décrite précédemment. Encore faudrait-il que l'alliage anti-usure choisi puisse être fourni sous forme de fil, c'est-à-dire qu'il soit *trefilable*. Ceci est rarement le cas.

Une solution beaucoup plus générale consiste à utiliser la matière anti-usure sous forme de *poudre*. Celle-ci peut être de nature métallique et destinée à s'allier au moins superficiellement au métal de base : il s'agira d'un *rechargement par soudage*. Mais elle peut être aussi non-métallique et constituée par des composés autres que des métaux ou des alliages, par exemple des oxydes, des carbures, des matières réfractaires, etc... qui ne s'allient pas avec le métal de base : on parlera alors de *rechargement par projection* ou plus simplement de *projection*.

a) Rechargement par soudage au plasma

Dans cette technique, la poudre est de nature métallique (métal ou alliage). Le processus de liaison de cette matière, une fois fondue par le jet de plasma, avec les couches superficielles du métal support, est le même que celui déjà exposé au § 12.1 traitant du rechargement par soudage à l'arc au moyen d'électrodes enrobées. Il y a cependant beaucoup moins de dilution, c'est-à-dire de mélange entre le métal de base et le métal déposé, ce qui représente un sérieux avantage.

L'appareillage se différencie principalement de celui décrit jusqu'ici par la présence d'un *distributeur de poudre*, dont il existe plusieurs modèles. Le plus simple (*fig.18.2*) consiste en un réservoir

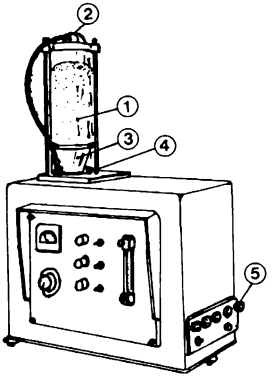


Fig.18.2

cylindrique en plexiglas 1 fixé sur un coffret de commande. On charge ce réservoir de poudre à projeter au moyen d'une goulotte 2. La poudre est distribuée par gravité, au moyen d'une trémie 3, sur un plateau tournant 4 ; elle est ensuite dégagée par un racloir et entraînée par le gaz de transport admis en 5 vers la torche (1). Le modèle représenté est prévu pour la projection de poudres dont la granulation va de 20 à 200 microns.

Le transport de la poudre à partir du distributeur s'effectue au moyen d'argon à faible débit. Quant à la torche, elle fonctionne suivant un principe constituant une combinaison de l'arc soufflé et de l'arc transféré. En effet, un redresseur alimente en courant continu l'électrode de tungstène (pôle -) et la tuyère (pôle +) mais *en plus*, une source de courant alternatif à moyenne fréquence (350 Hz) est connectée à la tuyère et à la pièce à recharger. L'arc plasma soufflé qui s'établit dans la torche sert donc de véhicule à ce courant alternatif, d'où le nom de système *à arc alternatif superposé*. On obtient de cette manière un arc très long qui produit un bain de fusion sur la surface à recharger et dont les variations de longueur sont sans influence sur l'aspect de la recharge.

Parmi les applications les plus courantes du rechargement par soudage au plasma, on peut citer :

a) le *stellitage* appliqué aux portées de soupapes de moteurs à combustion (voir § 12.2d), opération qui s'exécute avantageusement au moyen d'équipements complètement automatisés ;

b) le revêtement au moyen de divers alliages des bords d'attaque des ailettes de turbines dans le but d'augmenter leur résistance à la cavitation * .

b) Rechargement par projection au plasma

Ce procédé possède un champ d'application beaucoup plus étendu que le précédent car il permet de projeter de nombreuses matières à très haut point de fusion (de 2000 à 3500°C) pour revêtir des pièces métalliques ou non-métalliques devant être protégées vis-à-vis de la chaleur.

Les pièces à traiter doivent être préalablement sablées au corindon de manière à obtenir un état de surface suffisamment rugueux

(1) Certains constructeurs donnent à cette torche le nom de "chalumeau plasma".

permettant un bon *accrochage mécanique* de la matière projetée (1). Il n'y a pas, en effet, liaison des deux matières par fusion, contrairement au rechargement par soudage.

Le distributeur de poudre décrit précédemment convient dans la plupart des cas. La torche, fonctionnant suivant le système de l'*arc soufflé*, est alimentée en courant continu au moyen d'un redresseur dont la tension à vide est de 140 V. et qui peut débiter en charge des courants de 300 à 600 A.

C'est de l'argon qui sert pour l'amorçage de l'arc, mais des gaz beaucoup moins coûteux comme des mélanges argon-hydrogène, argon-azote et azote-hydrogène, peuvent être utilisés pour l'opération.

La poudre, injectée à l'intérieur ou à la sortie de la tuyère, est véhiculée par le jet de plasma dans lequel elle fond, puis projetée sur la pièce à recharger. Celle-ci ne subit qu'un très faible échauffement, ce qui élimine les risques de sa déformation.

Enfin, comme les diverses matières projetables sont sous forme de poudre, rien n'est plus facile que de procéder à des mélanges, ce qui permet de résoudre un grand nombre de problèmes.

Les matières utilisées jusqu'à présent pour la projection au plasma sont essentiellement celles qu'il est impossible de projeter au moyen d'un pistolet oxyacétylénique en raison de leur point de fusion trop élevé. Citons notamment :

l'oxyde d'aluminium ou *alumine*, point de fusion 1920°C, utilisé surtout pour le revêtement de pièces d'acier devant résister soit à l'oxydation ou à la corrosion à haute température (comme par exemple en sidérurgie pour les lances à oxygène, les fours de réchauffage de blooms, certaines surfaces de chambres de combustion ou de chaudières, les tours de craquage de pétrole) soit encore à l'abrasion, comme pour des organes de broyeurs ;

l'*oxyde de chrome*, point de fusion 1990°C, également pour les parois de chambres à combustion et de chaudières et en outre pour le revêtement intérieur de lingotières d'aciérie ;

l'oxyde de zirconium ou *zircone*, point de fusion 2600°C, le plus important des produits utilisés dans ce domaine malgré son coût élevé mais en raison de ses grandes propriétés réfractaires ; il est utilisé pour les mêmes applications que l'alumine et l'oxyde de chrome, et en outre pour la protection de brûleurs, de tubes de surchauffeurs, de rouleaux de fours de traitement thermique ainsi que pour la constitution de boucliers thermiques, notamment pour les fusées (matière de base : acier inoxydable) ;

---

(1) C'est en cela, en particulier, que le procédé s'apparente au rechargement au pistolet oxyacétylénique à poudre, décrit au chapitre "Rechargement" du "Manuel Pratique de Soudage aux Gaz et de Coupage thermique" du même auteur. Dunod, édit.

les *carbures de chrome, cobalt et tungstène* ou *stellites,* point de fusion ± 1250°C, pour la protection de gaines de thermocouples en inoxydable dans les tours de craquage de pétrole ;

le *carbure de chrome,* point de fusion 1890°C, pour les pales de ventilateur en alliage d'aluminium ;

le *carbure de tungstène,* point de fusion 2700°C, également pour les pales de ventilateur de four, les calibres d'outillage, les trépans de sondage et leurs couronnes d'extraction (carottiers) ;

les *cermets,* composés céramiques maintenus au moyen d'un liant métallique, dont on cite l'application comme revêtement antigrippage des opercules de vannes à registre.

Ajoutons encore à cette liste d'autres carbures comme le carbure de titane, des borures, des siliciures, enfin des sels métalliques tels que le zirconate de magnésium.

CHAPITRE 19

SOUDAGE PAR BOMBARDEMENT ÉLECTRONIQUE (OU PAR FAISCEAU D'ÉLECTRONS)

19.1. Principe du procédé

Dans ce procédé de développement relativement récent, le processus de la fusion s'apparente à celui du soudage plasma décrit dans le chapitre précédent. Cependant, la chaleur n'est plus produite au départ d'un gaz amené à l'état de plasma, mais bien par l'*énergie cinétique* * d'un faisceau d'électrons * .

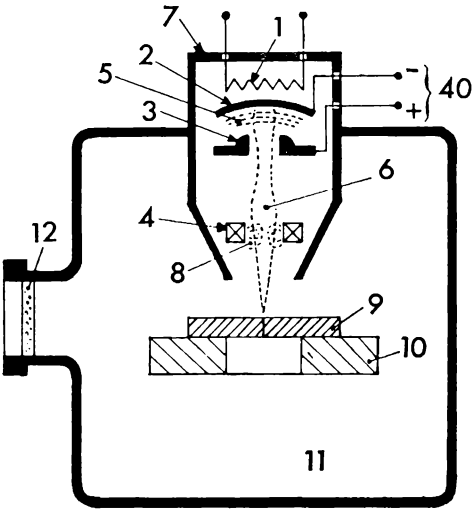


Fig.19.1

Schéma simplifié d'une installation de soudage par bombardement électronique

1. Filament de chauffage.
2. Cathode (-).
3. Anode (+).
4. Bobine magnétique de concentration.
5. Champ électrique.
6. Faisceau d'électrons.
7. Canon.
8. Champ magnétique.
9. Pièce à souder.
10. Table-support.
11. Enceinte sous vide.
12. Hublot.

Ce dernier est produit dans un dispositif spécial appelé "canon" (*fig.19.1*) au départ d'une cathode chauffée, et il est successivement accéléré par application d'une très haute tension (40 à 125 kV) entre la cathode et l'anode, puis "focalisé", c'est-à-dire dirigé et concentré par une action magnétique de façon à prendre une forme plus ou moins prismatique de section très réduite (une fraction de mm), d'ailleurs réglable. Projeté sur la pièce à souder, ce faisceau provoque la fusion de celle-ci sur une largeur très faible, mais sur une profondeur, également réglable, qui peut être considérable.

Caractéristique très importante du soudage par bombardement électronique : il s'applique en général dans une enceinte hermétiquement close et maintenue sous un *vide* très poussé. Ce vide permet aux électrons de dégager toute leur énergie et d'autre part, il évite toute contamination du métal par l'action des gaz atmosphériques.

Depuis quelques années, on a réussi à réduire la sujétion et le coût résultant de l'obligation d'un vide poussé dans l'entièreté du volume de l'enceinte : on ne maintient que le canon à électrons dans une enceinte de faible volume, dite "capotage", où règne un vide poussé, tandis que les pièces à souder sont enfermées dans une seconde enceinte où l'on ne doit maintenir qu'un vide plus réduit et par conséquent beaucoup plus rapide à obtenir.

Les deux enceintes sont alors raccordées par un conduit étroit obturé par une vanne spéciale, que l'on ouvre seulement au moment de souder.

Ce système est dénommé "soudage sous vide partiel" et s'accompagne dans certains cas d'une protection gazeuse. En général, il ne permet cependant pas d'atteindre l'extraordinaire pureté du métal fondu qui caractérise le procédé sous vide poussé.

Le soudage par bombardement électronique est exclusivement conduit de façon automatique, c'est-à-dire que l'avancement de la pièce devant le canon, suivant des lignes droites ou circulaires, est assuré par des combinaisons de mécanismes commandées de l'extérieur de la chambre à vide. Le contrôle de cet avancement s'effectue par examen visuel à travers un hublot approprié.

L'installation est évidemment d'autant plus coûteuse que les pièces à souder sont d'un plus grand volume et qu'elles nécessitent par conséquent une chambre de plus grandes dimensions. C'est pourquoi beaucoup d'ateliers, même très importants mais n'ayant pas un usage constant ou tout au moins très fréquent de l'installation, ont souvent intérêt à faire exécuter leurs travaux par des sous-traitants spécialisés qui se sont équipés et qui, travaillant pour une série de clients, parviennent à maintenir en service leurs installations avec un coefficient d'utilisation élevé. En procédant ainsi, les ateliers qui font appel au soudage par bombardement électronique réduisent du même coup, dans une large mesure, la période de mise au point d'un assemblage particulier que leur sous-traitant spécialisé a probablement déjà rencontré ou dont il a rencontré des exemples analogues.

19.2. Applications

En raison des particularités exposées plus haut, l'emploi du procédé se pose surtout pour les travaux de série sur des pièces de très haute qualité constituées par du cuivre désoxydulé, des aciers inoxydables, certains aciers autotrempants, ainsi que pour des as-

semblages en petite série ou même à l'unité sur des alliages coûteux à base de titane,de tantale,de molybdène,de zirconium, très altérables à chaud par l'action de l'oxygène et de l'azote atmosphériques, et de plus en plus utilisés dans les industries aéronautiques, spatiales et nucléaires. Le soudage par bombardement électronique est souvent applicable à des pièces dont la configuration ne permet pas l'assemblage par un autre procédé. Il est pratiquement le seul procédé capable de souder entre eux des métaux très dissemblables, tels que :

Aluminium	sur	Argent
Cuivre	sur	Inoxydable
Cuivre	sur	Inconel
Cuivre	sur	Titane
Monel	sur	Inoxydable
Inconel	sur	Acier
etc...		

Les épaisseurs pouvant être soudées vont de 0,05 à 25 mm, et des installations spéciales très puissantes permettent d'atteindre 100 mm.

Enfin, à cause du vide agissant sur les pièces en cours de soudage, les alliages contenant des métaux volatils, par exemple les laitons, qui contiennent du zinc, ne peuvent être soudés par bombardement électronique.

APPENDICE

RAPPEL DE QUELQUES DÉFINITIONS

(Les termes suivis du signe * sont expliqués ci-après)

Acier rapide (plus correctement : acier à coupe rapide) : acier allié à forte teneur en tungstène ou molybdène, éventuellement avec du chrome, du vanadium, du cobalt, utilisé pour la fabrication d'outils. Lorsqu'on travaille à grande vitesse, cet acier conserve une dureté telle que les copeaux peuvent sortir presque rouges sans que l'outil s'émousse ou se détrempe.

Affinité chimique : Tendance des corps à se combiner avec d'autres corps.

Aimant permanent : Par opposition à l'électro-aimant, l'aimant permanent est celui qui conserve très longtemps ses propriétés magnétiques en l'absence de courant inducteur. On dispose aujourd'hui d'aimants permanents très puissants en alliages spéciaux.

Argon : Gaz inerte, c'est-à-dire ne possédant aucune affinité chimique, et qui existe dans l'air dans la proportion d'un peu moins de 1%. Il peut en être extrait à l'état de grande pureté.

Atome : Particule d'un corps, non divisible par des moyens chimiques, et constituant la plus petite partie de ce corps qui puisse entrer dans une combinaison chimique. Les atomes sont essentiellement constitués d'un noyau positif et de particules satellites négatives appelées *électrons*.

Bar : Unité de pression valant 100.000 pascals (le pascal est l'unité normale de pression dans le système légal français d'unités). Le bar est une pression très voisine de la pression atmosphérique et du Kg/cm^2 . Il est encore couramment utilisé dans l'industrie pour les pressions gazeuses. Voir aussi Newton. L'*hectobar* (= 100 bars) servant à mesurer les contraintes et équivalant à env. 1 kg/mm^2 est actuellement remplacé par le newton par mm^2 . Un hectobar = 9,8 newton par mm^2 (N/mm^2).

Carbonique (anhydride), formule chimique CO_2 : couramment dénommé "acide carbonique" ou "gaz carbonique", c'est un gaz actif, donc capable de réagir, notamment comme oxydant, avec des corps tels que les métaux. Utilisé depuis longtemps dans de nombreuses industries, ce n'est que depuis les années 1950 qu'il s'est introduit dans le domaine du soudage.

Carburation : En métallurgie, incorporation à un métal ou à un alliage d'une certaine quantité de carbone.

Cavitation : Formation de cavités remplies de gaz ou de vapeur au sein d'un liquide en mouvement rapide. Ce phénomène joue un rôle important dans l'usure des organes tels que les pales de turbines, les hélices de bateau à grande vitesse, etc...

Condensateur : Dispositif formé par deux surfaces conductrices voisines séparées par un isolant tel que de l'air. Un tel dispositif intercalé dans un circuit alternatif constitue une "capacité" qui, contrairement à une bobine d'inductance ou de self-induction, déphase (§ 2.4) les variations de I en avant de celles de E .

Ductile : Au sens propre, se dit d'un métal qui peut être amené sous forme de fil. Actuellement, ce terme s'applique par extension aux matériaux possédant, à froid, une certaine capacité de déformation. L' allongement d'une éprouvette au cours de l'essai de traction constitue une mesure de sa ductilité.

Eclateur : Appareil constitué généralement par deux boules métalliques légèrement écartées, entre lesquelles jaillit une étincelle lorsque la différence de potentiel entre les deux boules dépasse une certaine valeur. En haute fréquence (soudage, T.S.F. etc..), l'éclateur joue le rôle d'un interrupteur automatique à grande vitesse du circuit oscillant et sert à charger et décharger le condensateur.

Elastique (limite) : Effort maximal supporté par un matériau pour qu'après suppression de cet effort il revienne à ses dimensions initiales. Au-delà de cet effort subsiste une déformation permanente.

Electron : Voir Atome.

Energie cinétique ou force vive : Travail accompli par une particule de masse M se déplaçant à une vitesse v . Cette énergie est proportionnelle à cette masse et au *carré* de cette vitesse.

Fatigue : Travail supporté par une pièce métallique par suite d'une succession prolongée d'efforts répétés ou alternés, dont un seul ne suffirait pas à amener la déformation permanente de cette pièce.

Fluage : Déformation lente d'un matériau soumis à une tension constante, en général à chaud. Cette déformation peut se poursuivre jusqu'à rupture.

Flux magnétique : Le champ magnétique, c'est-à-dire la partie de l' espace où s'exerce une action magnétique, se représente conventionnellement par un certain nombre de lignes (parallèles si le champ est uniforme) appelées *lignes de force*. Un faisceau de lignes de force constitue un "flux magnétique".

Fusion : Passage de l'état solide à l'état liquide. Pour les métaux purs, ce passage a lieu à une température fixe bien déterminée. Pour les alliages, il y a le plus souvent un "palier de fusion", c'est-à-dire que la fusion commence à une certaine température (solidus) et n'est complète qu'à une autre température (liquidus). Ces deux températures varient suivant la composition de l'alliage.

Hectobar : Voir Bar.

Hélium : Gaz inerte existant dans l'air en très faible proportion : 0,0005% soit 5 cm^3 par m^3. On l'extrait généralement, notamment aux Etats-Unis et au Canada, de certains gaz naturels.

Hétérogène : Contraire d'homogène.

Homogène : Se dit d'une matière qui possède en tous ses points la même composition et la même structure. Voir ce dernier mot.

Hygroscopique (ou mieux *hygrophile*) : Se dit d'une matière qui possède la propriété d'absorber l'humidité.

Impédance : Cette grandeur, qui se mesure en ohms comme la résistance, est pour le courant alternatif ce qu'est la résistance pour le courant continu. Elle dépend, non seulement de la résistance ohmique du circuit, mais aussi de la fréquence du courant, du coefficient de self-induction et de la capacité de ce circuit. Voir : Inductance et Condensateur.

Inductance ou (bobine de) self-induction : Bobine constituée par un enroulement de spires conductrices autour d'un noyau de fer.

Induction électro-magnétique : Si un conducteur non fermé sur lui-même se trouve placé dans un champ magnétique dont l'intensité varie (v. Flux magnétique), il se développe dans ce conducteur, pendant tout le temps que dure la variation, une certaine force électromotrice. Si l'on ferme ce conducteur sur lui-même, cette force électromotrice donne naissance à un certain courant. Ce phénomène s'appelle "induction électro-magnétique".

Inerte : Qualifie les corps, et en particulier les gaz, qui ne réagissent chimiquement, ni à froid ni à chaud, avec aucun autre corps. Ce sont les gaz rares contenus dans l'air et notamment l'argon et l'hélium.

Infra-rouges (Rayons) : Rayons lumineux non perceptibles par l'oeil humain et dont la longueur d'onde est supérieure à celle des rayons visibles de couleur rouge. De tels rayons sont produits en abondance par les corps métalliques portés à haute température.

Ionisation des gaz (voir également Atome) : Phénomène dans lequel les atomes d'un gaz perdent une partie de leurs électrons et deviennent alors positifs, ou au contraire s'adjoignent des électrons et deviennent alors négatifs. Des atomes ainsi modifiés s'appellent des *ions*. Ce phénomène rend le gaz conducteur de l'électricité.

Liquidus : Voir Fusion.

Malléable : Un métal est dit malléable lorsqu'il se laisse facilement transformer en feuille mince par un effort d'écrasement approprié, tel qu'un laminage.

Molécule : La plus petite particule d'un corps simple ou composé qui puisse exister à l'état libre. En général, elle comprend deux ou plusieurs atomes.

Newton : (N) : Unité officielle française de force, équivalant approximativement à 0,1 kilogramme-force (exactement 0,102).

Newton par mm^2 : (N/mm^2) : Unité utilisée pour les contraintes (résistance, limite élastique, etc..) et équivalant approximativement à 0,1 kgf/mm^2 ou à 0,1 *hectobar* (ancienne mesure).

Newton par cm^2 : (N/cm^2) : Unité utilisée pour les pressions de gaz et équivalant approximativement à 0,1 *bar* (ancienne mesure).

Paramètre : Grandeur généralement mesurable figurant comme variable dans un système. Pour les paramètres de soudage, voir § 17.5.h.

Recuit : D'une façon générale, réchauffage d'un métal à une certaine température. Le "recuit proprement dit" qu'il est préférable de désigner sous le nom de *recuit complet* ou de *recuit de normalisation*, consiste à chauffer le métal au-dessus d'une température bien déterminée, caractéristique de sa composition, et à laquelle se produit une transformation cristalline. Le refroidissement doit alors être relativement lent, en général.

Réducteur : Corps capable de se combiner avec l'oxygène d'un oxyde métallique et de laisser ainsi le métal à l'état libre.

Revenu : Réchauffage, généralement après trempe, à une température inférieure à celle du recuit complet.

Self-induction : Voir Inductance.

Solidification : Passage de l'état liquide à l'état solide. Phénomène inverse de la fusion (v. ce mot) et donnant lieu à la même remarque.

Solidus : Voir Fusion.

Structure : Les métaux et leurs alliages sont, à l'état solide, composés de cristaux ou grains généralement très petits et enchevêtrés. La façon dont ces grains sont répartis, leurs dimensions, leur régularité, leur composition, peuvent s'étudier au microscope (micrographie) et caractérisent l'état ou *structure*.

Tensions résiduelles : Si un solide quelconque, qui n'est soumis à aucune force extérieure, peut être sectionné suivant une surface quelconque sans que les deux parties sectionnées présentent, après séparation, le moindre changement de forme, on dit que le solide se trouvait en *équilibre interne*. Si au contraire, après sectionnement, les parties sectionnées se sont déformées, on dit qu'il existait, dans le solide, des "tensions résiduelles". Ces tensions ont été partiellement ou totalement libérées par ce changement de forme.

Trempe : Traitement applicable aux alliages qui possèdent une température de transformation (v. Recuit) et qui consiste à les chauffer au-delà de cette température et à les refroidir rapidement de façon à maintenir la structure existant à chaud. En général, la trempe augmente la dureté et diminue la ductilité.

Ultra-violets (Rayons) : Rayons lumineux non perceptibles par l'oeil humain et dont la longueur d'onde est inférieure à celle des rayons visibles de couleur violette. De tels rayons sont notamment produits par les flammes à haute température et surtout par l'arc électrique.

SYMBOLES CHIMIQUES D'ÉLÉMENTS CITÉS DANS CE MANUEL

A : Argon	He : Hélium	S : Soufre
Al : Aluminium	Mg : Magnésium	Se : Sélénium
B : Bore	Mn : Manganèse	Si : Silicium
C : Carbone	Mo : Molybdène	Ta : Tantale
Co : Cobalt	N : Azote	Ti : Titane
Cr : Chrome	Nb : Niobium	V : Vanadium
Cu : Cuivre	Ni : Nickel	W : Tungstène
Fe : Fer	O : Oxygène	Zn : Zinc
H : Hydrogène	P : Phosphore	Zr : Zirconium

IMPRIMERIE OFFSET-AUBIN, 86000 POITIERS
Dépôt légal, 4e trimestre 1979. Impr., P 9103.
Imprimé en France.

Extrait de notre catalogue

J. KARR

Gammes d'usinage et Analyses de phases
Etude de Fabrication Mécanique

Lycées Techniques. IUT. Promotion sociale.

136 pages — 18,5 × 27 — Broché

G. COTANT

Technologie professionnelle du travail des métaux en feuilles, tubes, profilés.

Lycées Techniques. Formation permanente.

368 pages — 13 × 22 — Broché

R. CHARBUY - P. JUSTE

Dessin de serrurerie et charpente métallique.

Lycées Techniques. Lycée d'enseignement professionnel. Cours Professionnels.

136 pages — 21 × 29,7 — Broché

G. HILLY - C. CHAUSSIN

Cours de Métallurgie

Préparation aux baccalauréats de technicien F1 et F3. Classes terminales.

256 pages — 16 × 25 — Broché

C. LEMASSON - J. GAL

Mécanique 1re BTn (F1, F2, F3, F4)

Tome I : Statique et Cinématique

320 pages — 17,5 × 25,3 — Broché

Tome II : Statique graphique, résistance des matériaux

256 pages — 17,5 × 25,3 — Broché

Mécanique terminales BTn (F1, F2, F3, F4)

Tome I : Dynamique, mécanique des fluides, thermodynamique

296 pages — 17,5 × 25,3 — Broché

Tome II : Résistance des matériaux

320 pages — 17,5 × 25,3 — Broché

E. SODANO

FORMULAIRE GUIDE D'ATELIER DE FABRICATION MÉCANIQUE

C.A.P., B.E.P., brevet et baccalauréat de technicien, concours d'entrée aux écoles d'ingénieurs

288 pages, 13 x 18. Broché

Manuels pratiques Dunod

L. MENDEL

MANUEL PRATIQUE DE SOUDAGE AUX GAZ ET DE COUPAGE THERMIQUE

256 pages, 245 figures. Broché

E. SODANO

MANUEL PRATIQUE DE L'AJUSTEUR MÉCANICIEN

Opérations manuelles et sur machines-outils

240 pages, 347 figures. Broché.

ISBN 2-04-003397-1